



Einführung in die Astrophysik

Kapitel 11: Galaxienhaufen und Dunkle Materie

Im WS 2009/2010 jeweils **Dienstag, 14:00 –15:30**

Ort: TUM, Garching, PhHS2

Günther Hasinger (IPP), Frank Eisenhauer (MPE)

guenther.hasinger@ipp.mpg.de, eisenhau@mpe.mpg.de

Tel: 089/30000-3563

<http://www.mpe.mpg.de/~eisenhau>

Speziellen Dank für Folien an

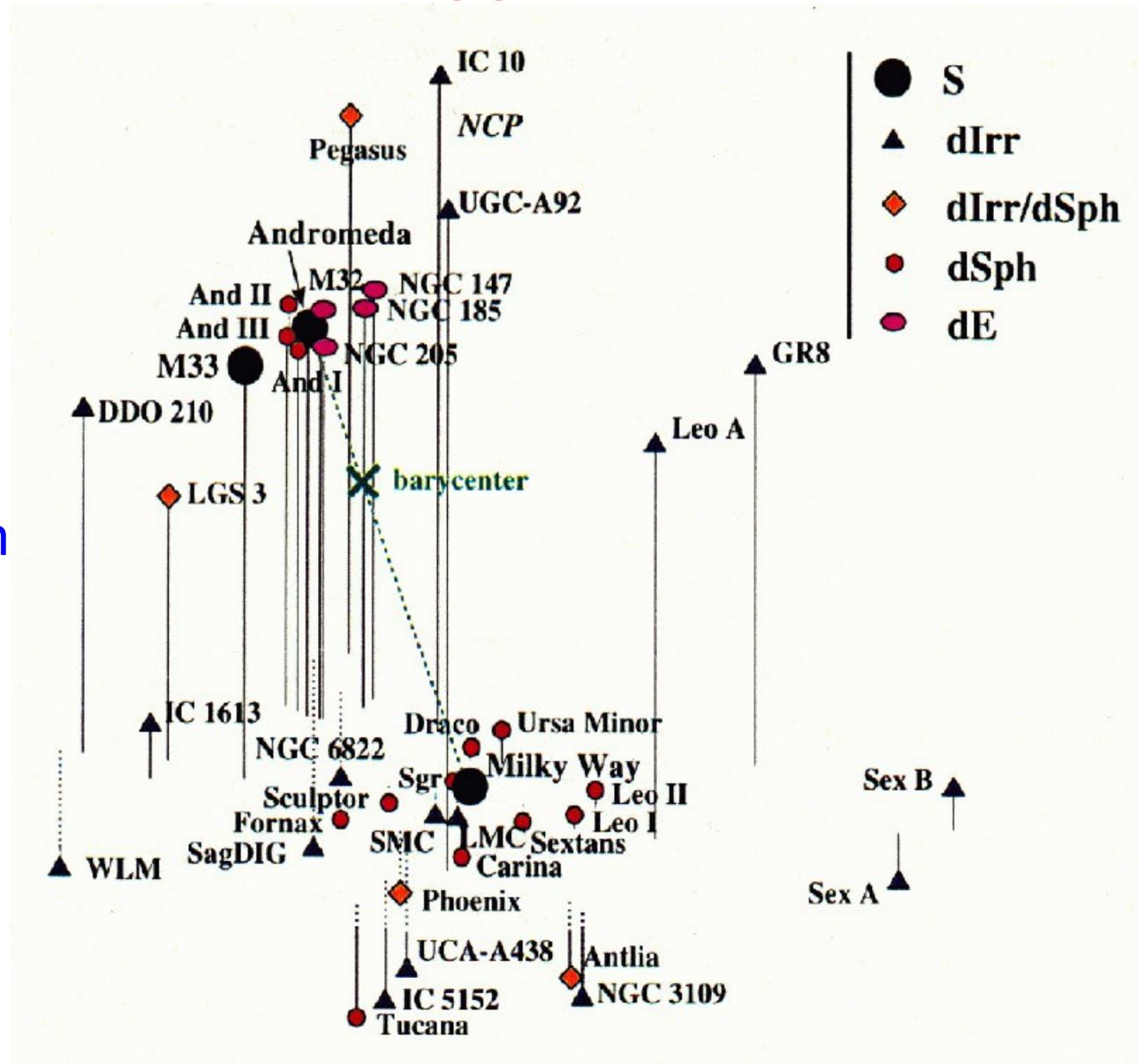
- Friedrich Kupka (Vorlesung WS 04/05)
- Ralf Bender (IMPRS Lectures)

Inhalt

0. Übersicht
1. Eine Reise durch das Universum
2. Strahlung und Materie
3. Teleskope und Satellitenexperimente
4. Sterne: Globale Eigenschaften, Spektren, Aufbau
5. Sternentwicklung und Endstadien der Sterne
6. Interstellares Medium
7. Kosmische Entfernungsleiter
8. Galaxien
9. Schwarze Löcher, Aktive Galaxien
10. Spiralgalaxien, Elliptische Galaxien, Zwerggalaxien
11. Galaxienhaufen und Dunkle Materie
12. Kosmologie, Großräumige Strukturentstehung

11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Lokale Gruppe

Räumliche
Verteilung der
Galaxien der lokalen
Gruppe



11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Lokale Gruppe

- Die Milchstraße gehört zu einer losen Ansammlung von Galaxien, die “Lokale Gruppe” genannt wird.
- Die hellsten Mitglieder der Gruppe sind die Andromeda Galaxie (M31), die Milchstraße, und M33, drei Spiralgalaxien.
- Neben M32 (die nicht sehr typisch ist) und den noch kleineren Galaxien NGC 147, 185, und 205 gibt es in der Lokalen Gruppe keine Elliptischen Galaxien.
- Der häufigste in der Lokalen Gruppe angetroffene Galaxientyp sind die irregulären (wie die Große und Kleine Magellansche Wolke) und die Zwerg-elliptischen.
- Die Gesamtzahl der bekannten Mitglieder der Lokalen Gruppe ist etwa 40, aber es gibt vermutlich eine Anzahl bisher unentdeckter Zwerggalaxien (z.B. hinter der Milchstraßenebene).
- Alle Galaxien der Lokalen Gruppe sind gravitativ gebunden (M31 nähert sich der Milchstraße mit 120 km/s).

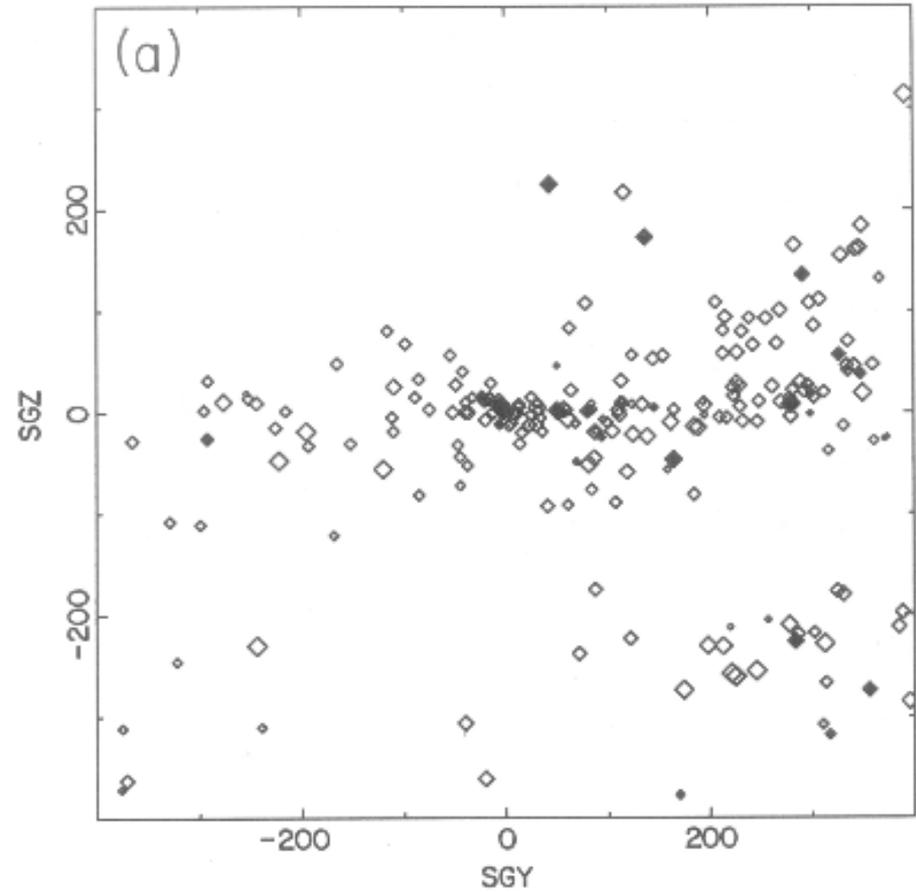
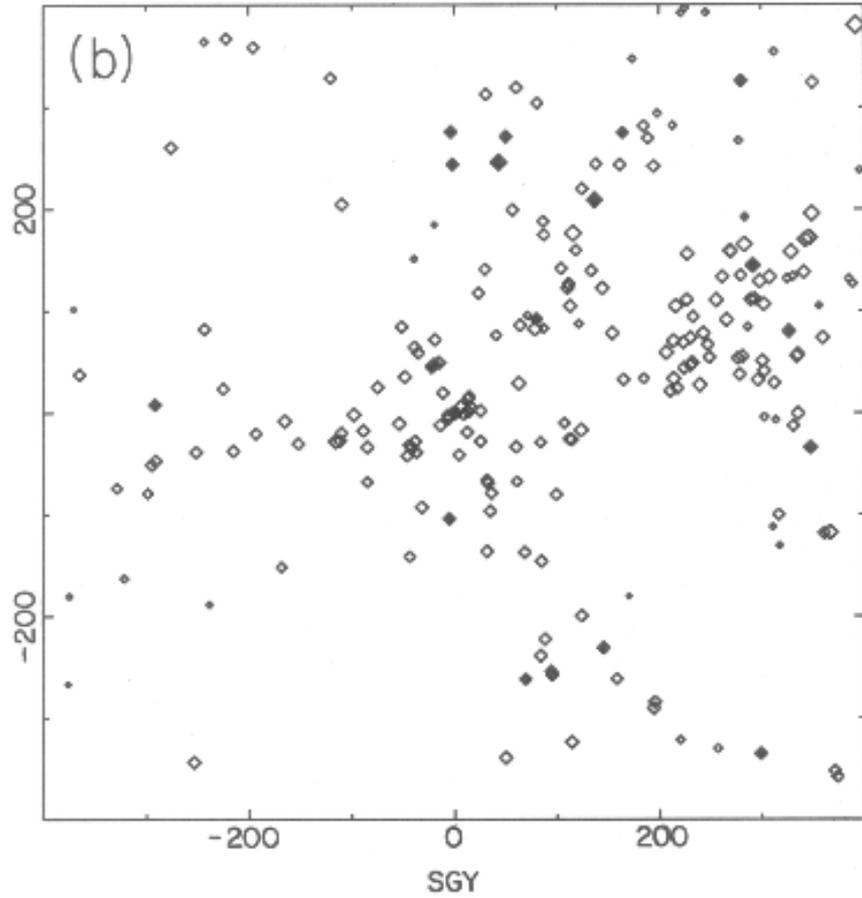
11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Supergalaktische Ebene

Supergalaktische Ebene

- In der Umgebung der Milchstraße befinden sich die meisten Galaxien in **einer Ebene**, der sogenannten Supergalaktischen Ebene
- Das zugehörige Supergalaktische Koordinatensystem hat die **Milchstraße als Ursprung**
- Die (X, Y) Ebene entspricht der Supergalaktischen Ebene, wobei die Z Achse in etwa auf den **Virgohaufen** ausgerichtet ist

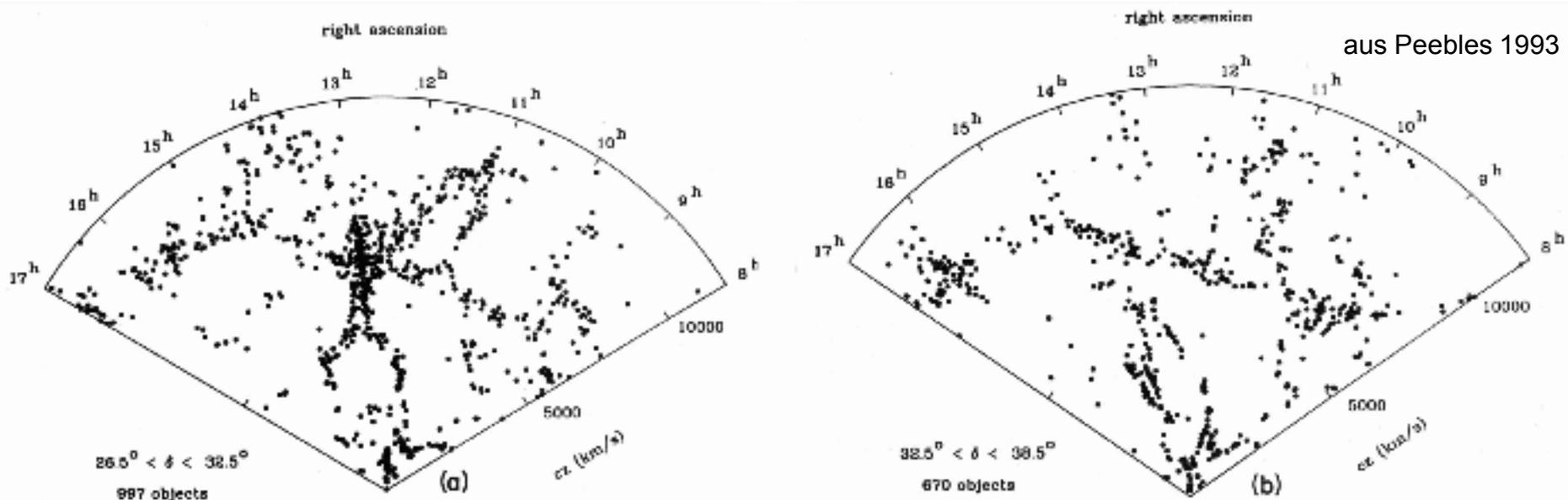
Die folgenden Abbildungen (aus Peebles 1993, Principles of Physical Cosmology) zeigen die Supergalaktische Ebene von der Seite und in Draufsicht, die Einheiten der Achsen sind km/s, jede Abbildung erstreckt sich über $8 h^{-1}$ Mpc.

11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Supergalaktische Ebene



11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Superhaufen

Die Galaxien sind nicht gleichmäßig im All verteilt, sondern entlang von Filamenten, Ebenen und Superhaufen, die von Gebieten mit geringer Galaxiendichte umgeben sind (voids):



Typische Längenskalen

- Galaxien ~ 10 kpc
- Galaxienhaufen $\sim 0.3 \dots 5$ Mpc
- Superhaufen ~ 50 Mpc

Superhaufen sind die größten bekannten Strukturen im Universum

11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Superhaufen

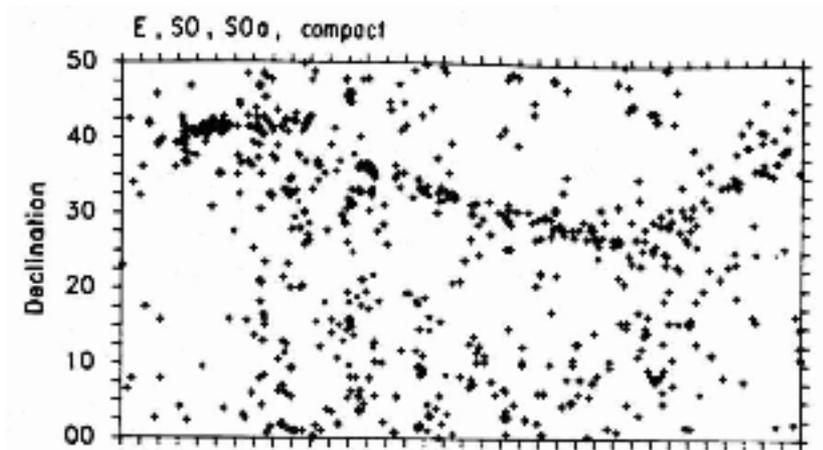


FIG. 6b

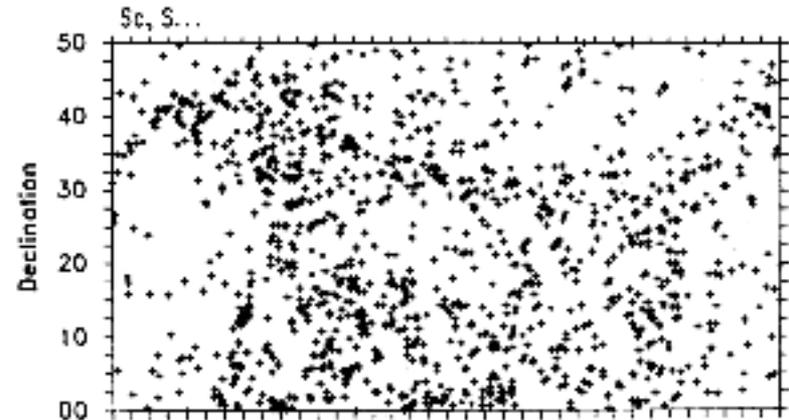


FIG. 6d

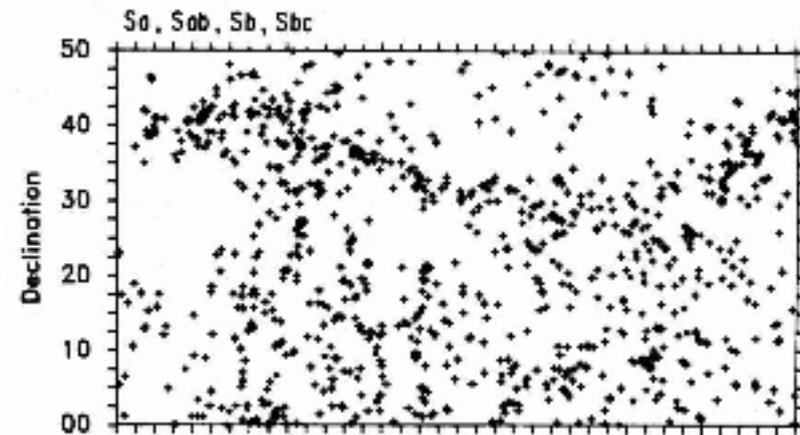
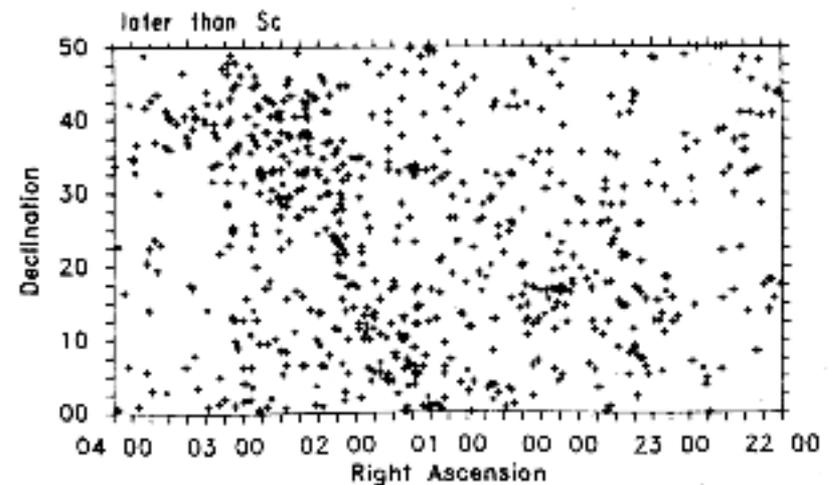


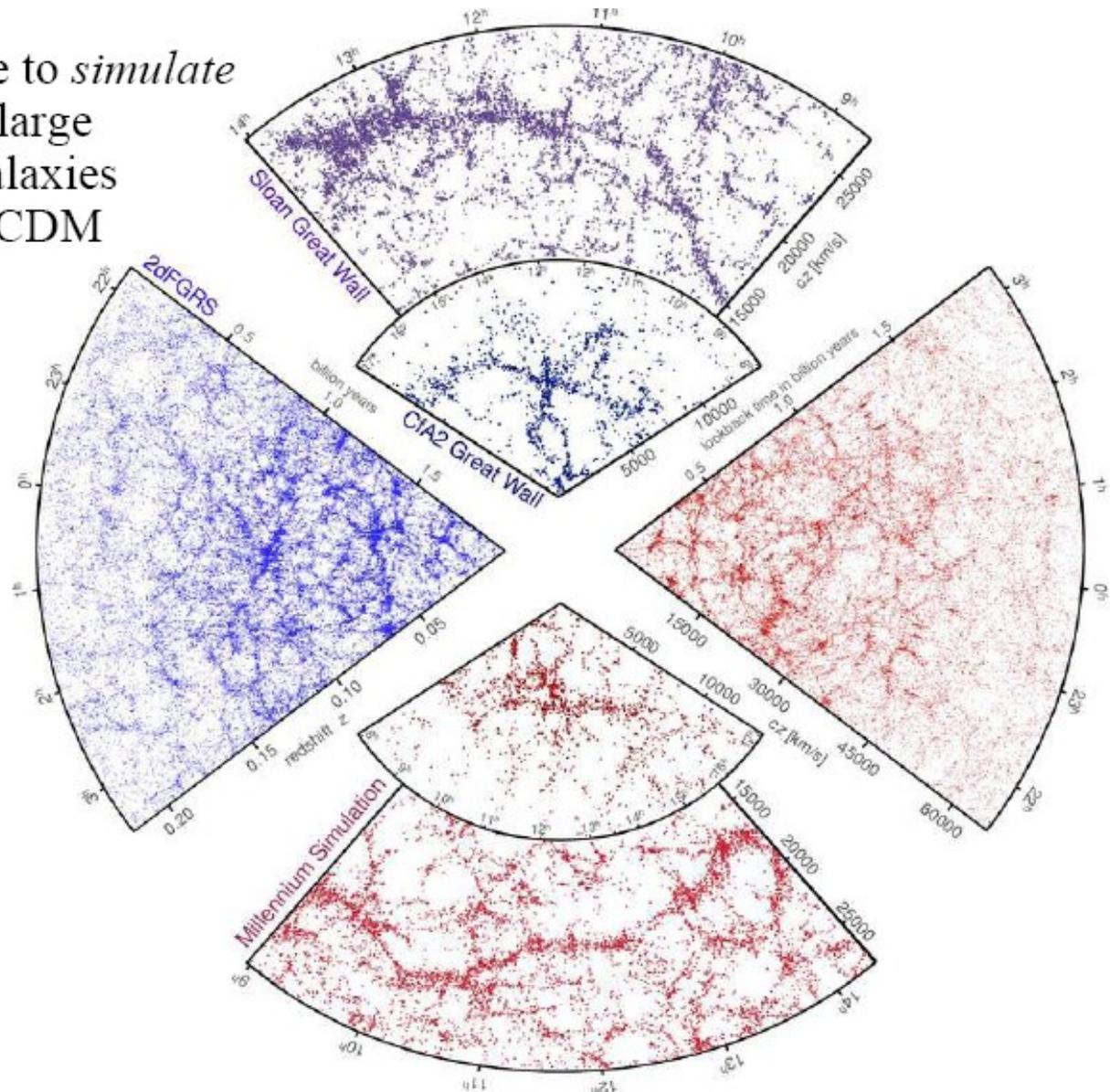
FIG. 6c



Elliptische Galaxien konzentrieren sich stärker in den Superhaufen als Spiralgalaxien

11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Vergleich mit Simulationen

It is now possible to *simulate* the formation of large populations of galaxies in their proper Λ CDM context



11.1 Die lokale Galaxienverteilung: Simulation



11.2 Galaxienhaufen: Überblick

- Galaxienhaufen sind die **größten und massereichsten** wohldefinierte Objekte im Universum
 - Ausdehnung $\sim 1\text{-}2$ Mpc
 - Enthalten ~ 30 bis 300 Galaxien (davon $\sim 5\%$ heller als die Milchstraße)
 - Geschwindigkeitsdispersion $\sim 400 - 1400$ km/s
 - Masse $\sim 10^{14} - 10^{15}$ Sonnenmassen
 - Leuchtkraft $\sim 10^{11} - 10^{13}$ Sonnenleuchtkräfte
 - Masse/Leuchtkraft Verhältnis $\sim 300 M/L_{\text{Sun}}$
- So wie Sterne benutzt werden, um die Struktur unserer Milchstraße zu erforschen, können Galaxienhaufen herangezogen werden, um auf die **Struktur des Universums** zu schließen

11.2 Galaxienhaufen: Virgo Haufen

- Nächster großer Galaxienhaufen mit mehr als **2000 Galaxien**, die **heller als $M_B \simeq -14$** sind
 $L_B > 10^{7.8} L_\odot$
- Entfernung **~ 17 Mpc**
- Ausdehnung **$\sim 10^\circ \triangleq 3$ Mpc**
- Unregelmäßiger Haufen
- Dichteste Gebiete von Elliptischen Galaxien dominiert
- Geschwindigkeitsdispersion der Galaxien ca. **600 km/s**

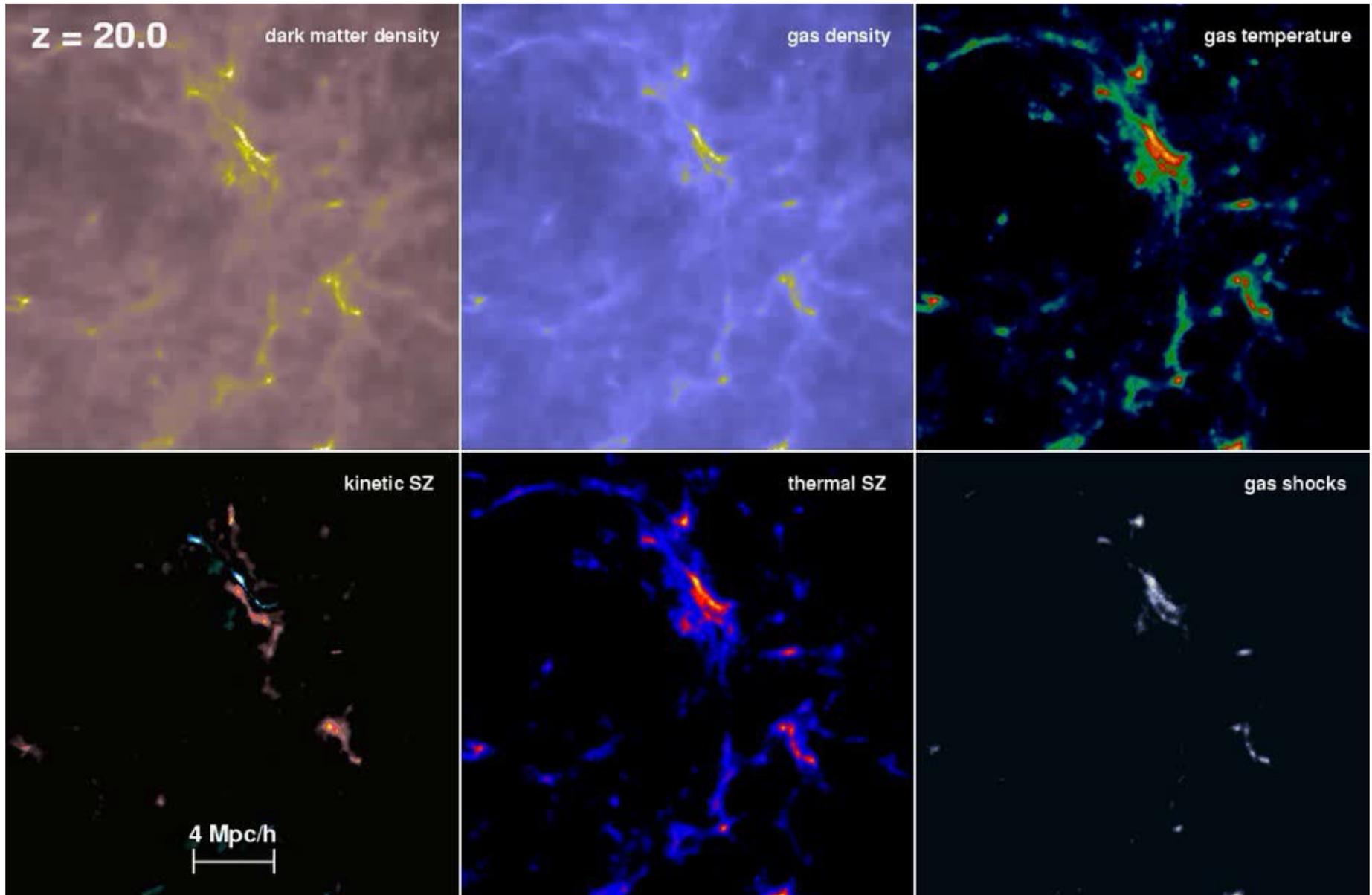


11.2 Galaxienhaufen: Coma Haufen

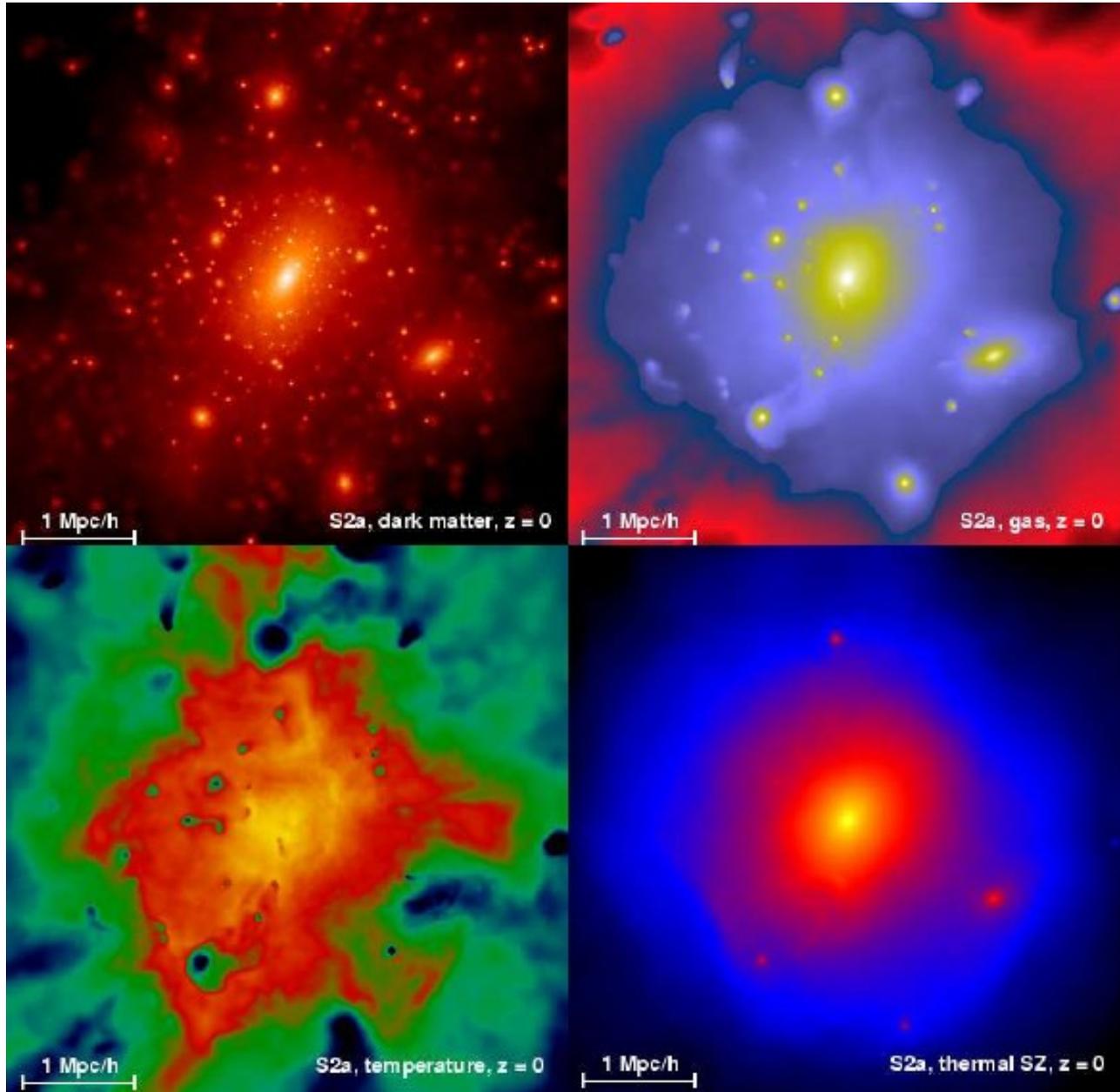
- Einer der leuchtstärksten, bekannten Galaxienhaufen
- Entfernung ~ 100 Mpc
- Regelmäßiger Haufen mit Unterhaufen
- Dominiert von Elliptischen und S0 Galaxien, 2 zentrale cDs, 1 in Unterhaufen
- Geschwindigkeitsdispersion der Galaxien circa 1000 km/s
- Starke Röntgenquelle



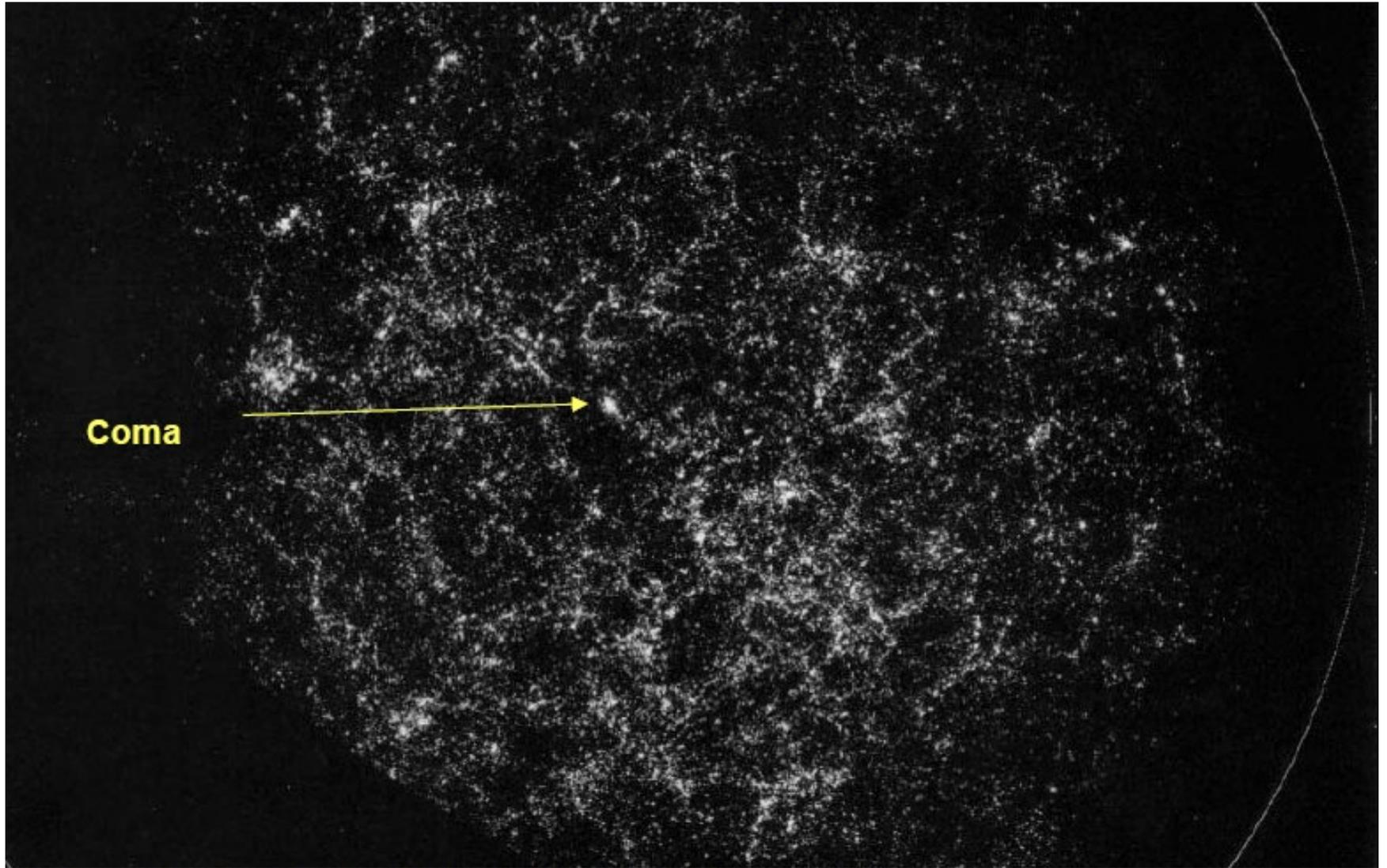
11.2 Galaxienhaufen: Entstehung



11.2 Galaxienhaufen: Entstehung

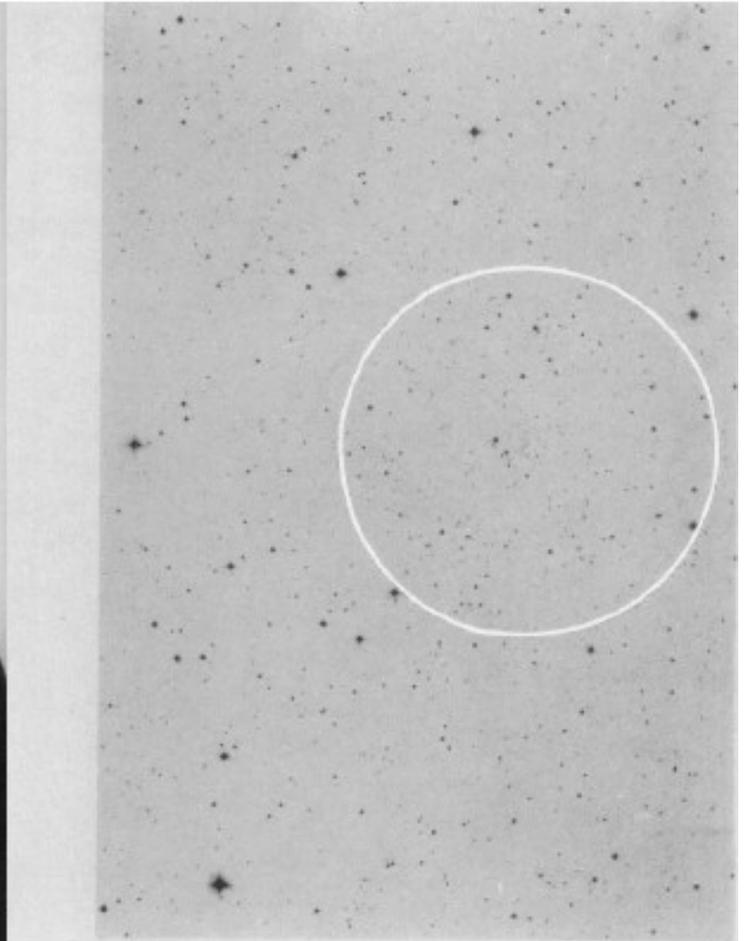


11.2 Galaxienhaufen: Großräumige Struktur

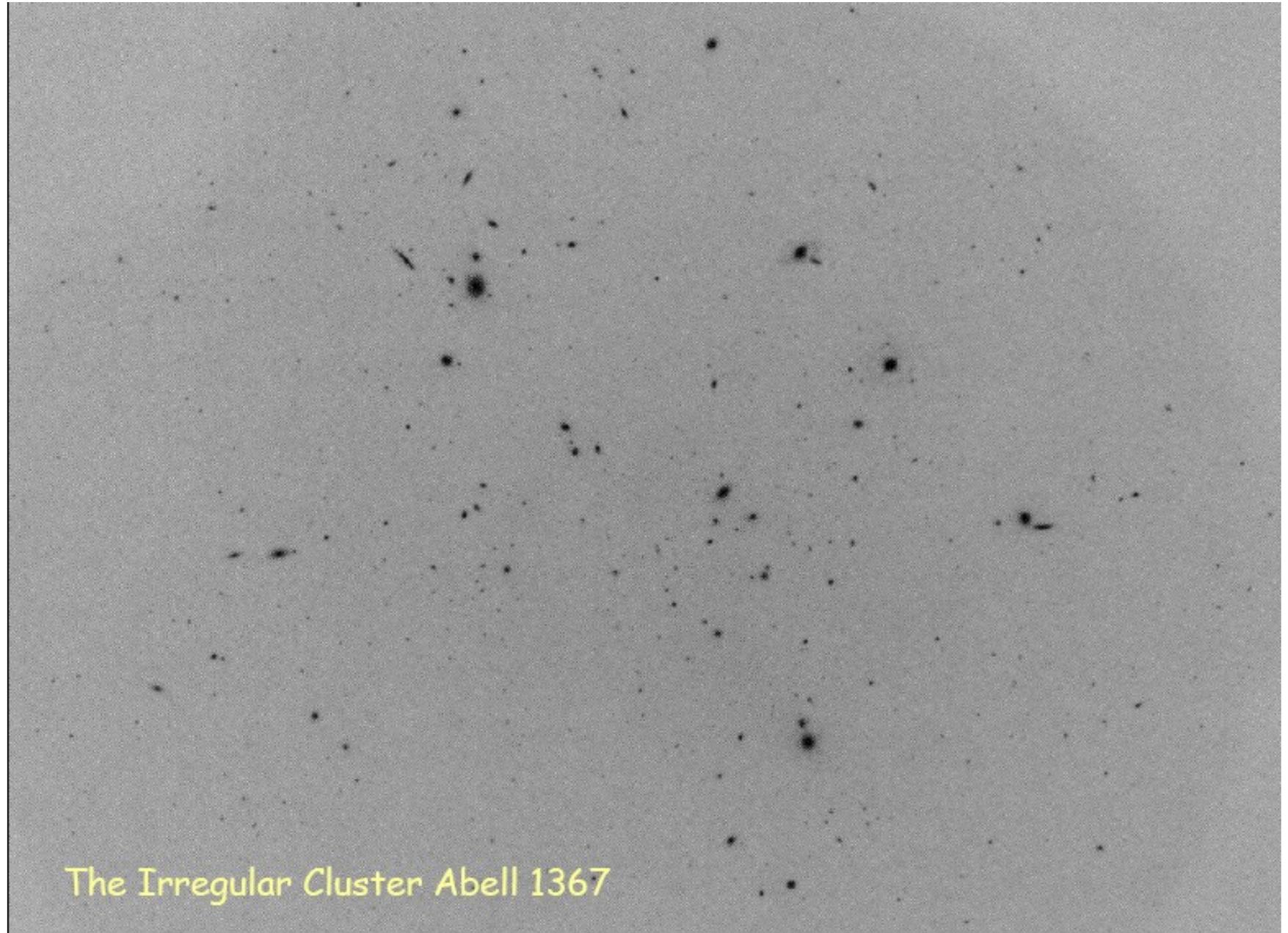


Shane Virtanen Katalog (1957)

11.2 Galaxienhaufen: George Abell

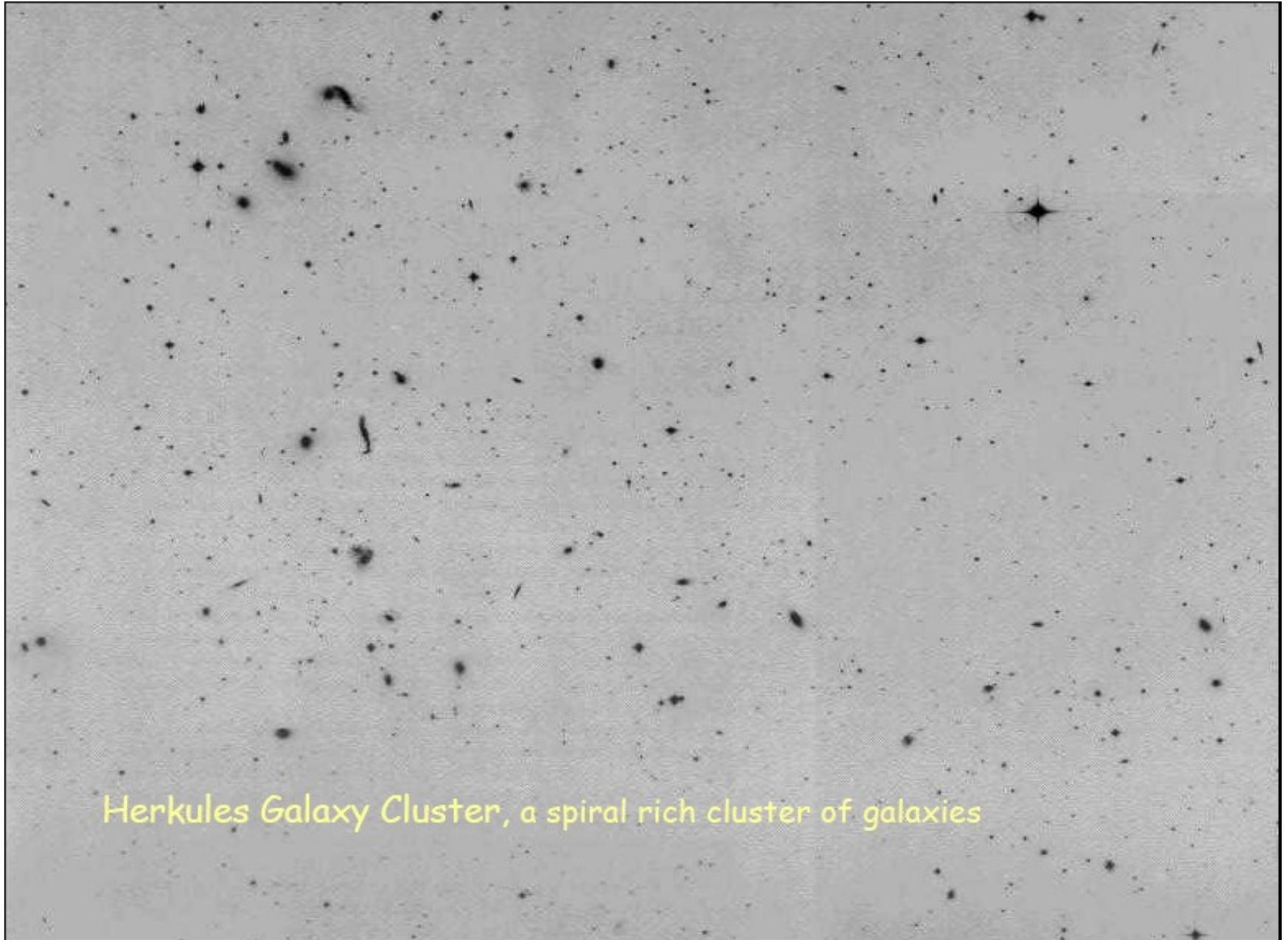


11.2 Galaxienhaufen: George Abell



The Irregular Cluster Abell 1367

11.2 Galaxienhaufen: George Abell



Herkules Galaxy Cluster, a spiral rich cluster of galaxies

11.2 Galaxienhaufen: Abell-Haufen

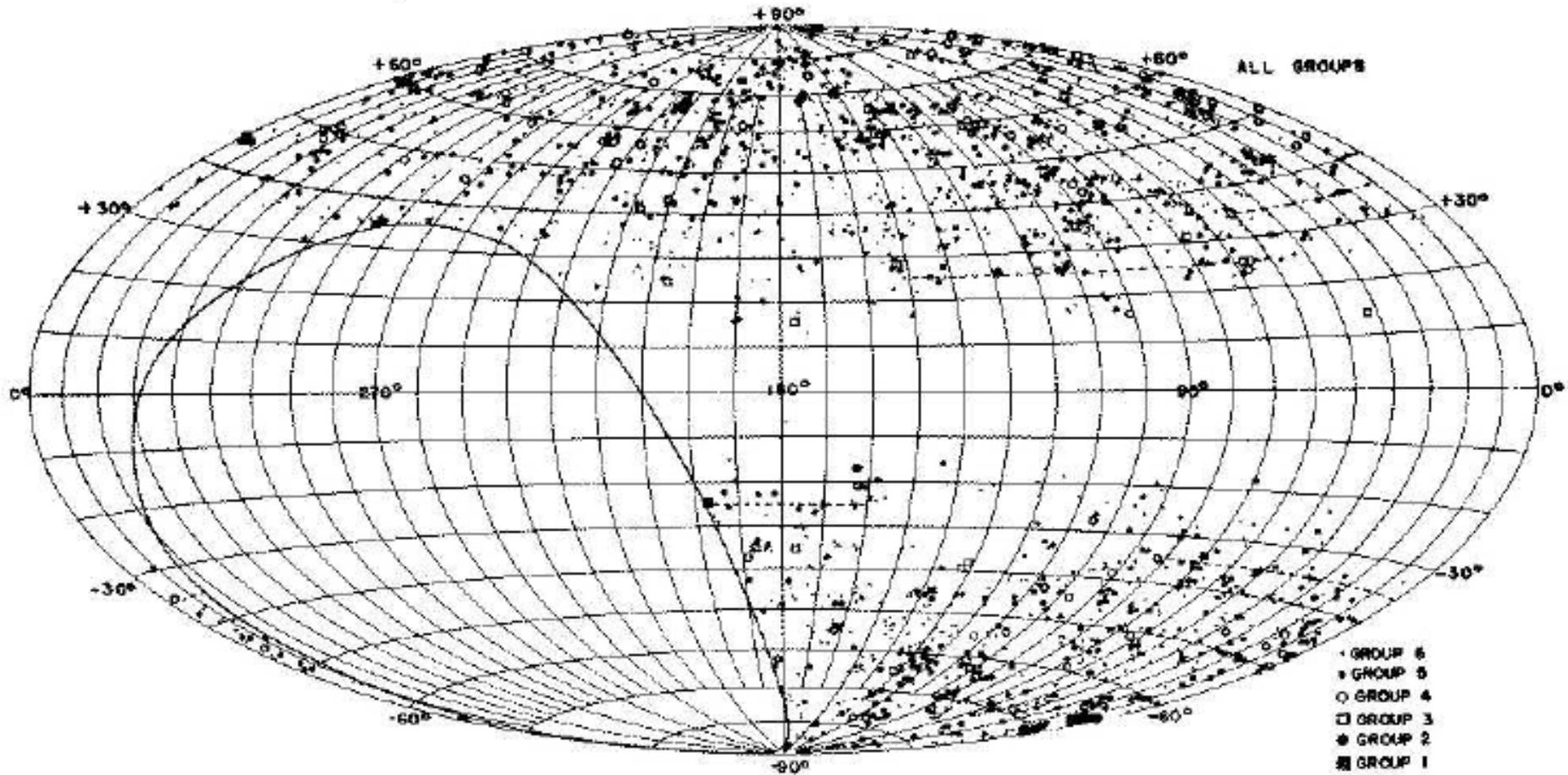
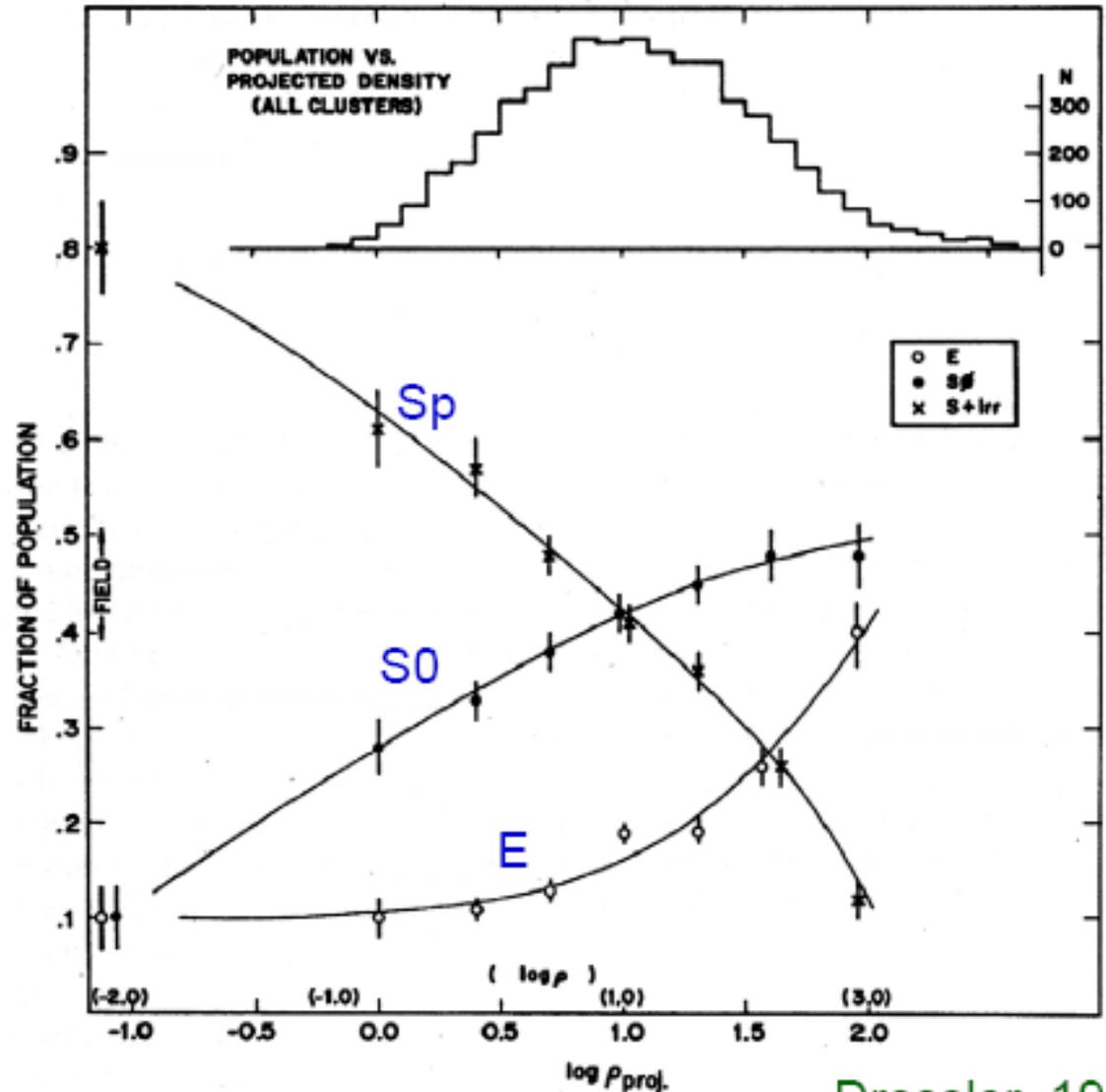


FIG. 7.—The distribution in galactic co-ordinates of the catalogued clusters in richness groups 1–5 and distance groups 1–6, inclusive. The plot is on an Aitoff equal-area projection.

Aus Palomar Himmelsdurchmusterung: **4000**
Galaxienhaufen, mindestens 30 Haufen mit $z > 0.2$ (1958)

11.2 Galaxienhaufen: Galaxienverteilung

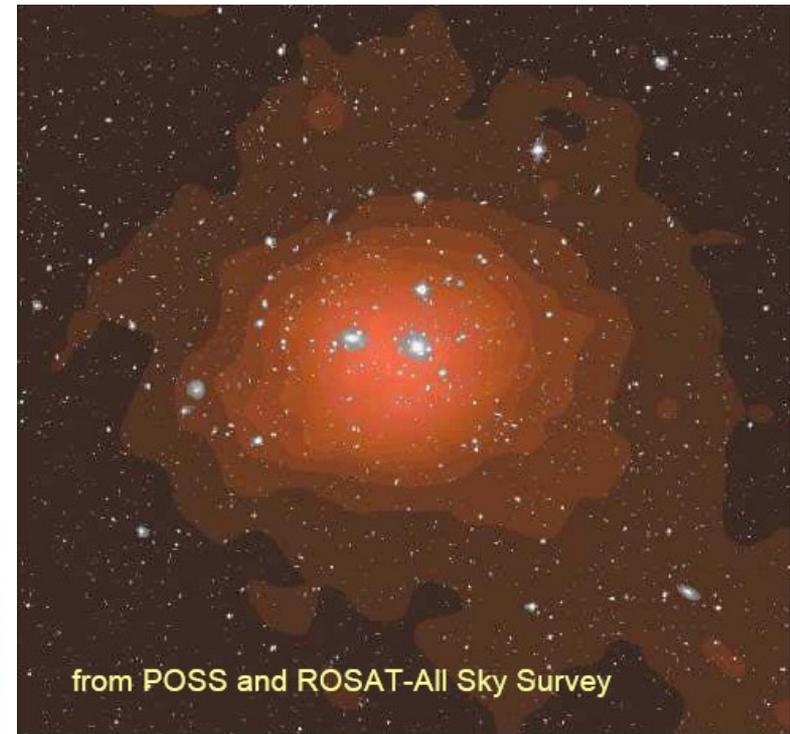
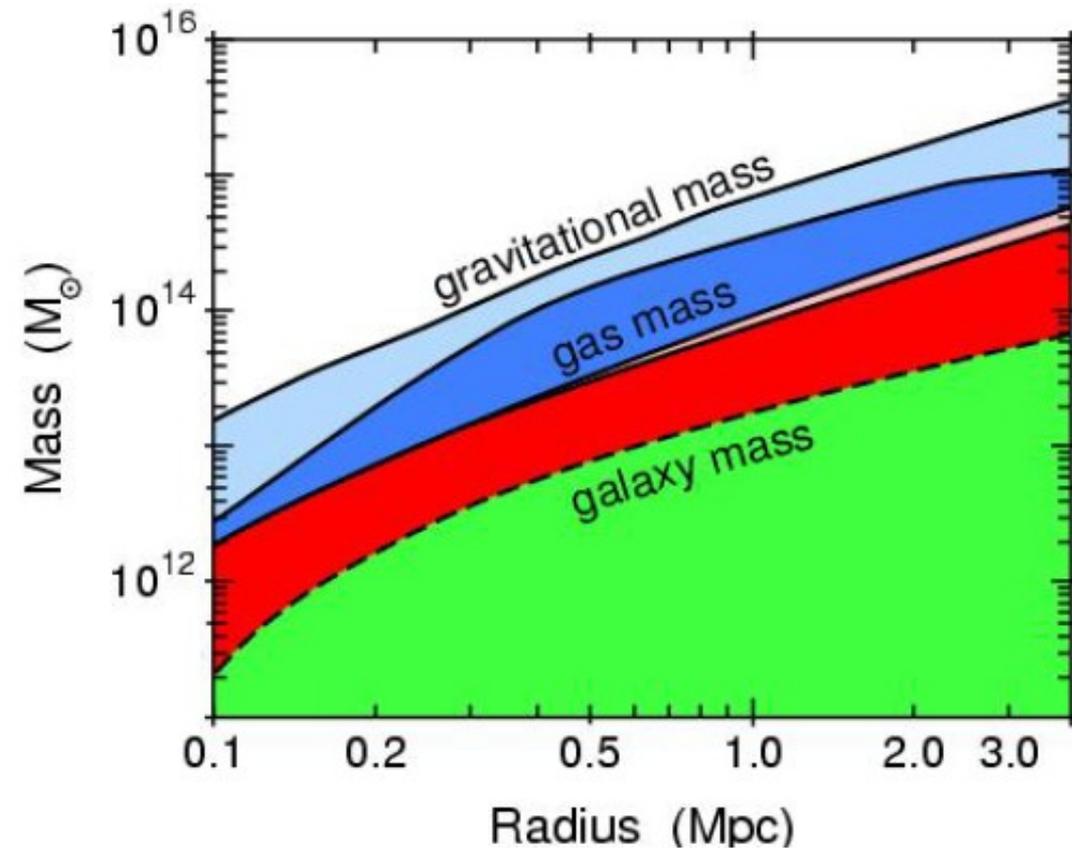
- Elliptische und S0 Galaxien hauptsächlich in Gebieten mit hoher Galaxiendichte
- Spiralgalaxien und Irreguläre Galaxien bevorzugen weniger dichte Gebiete



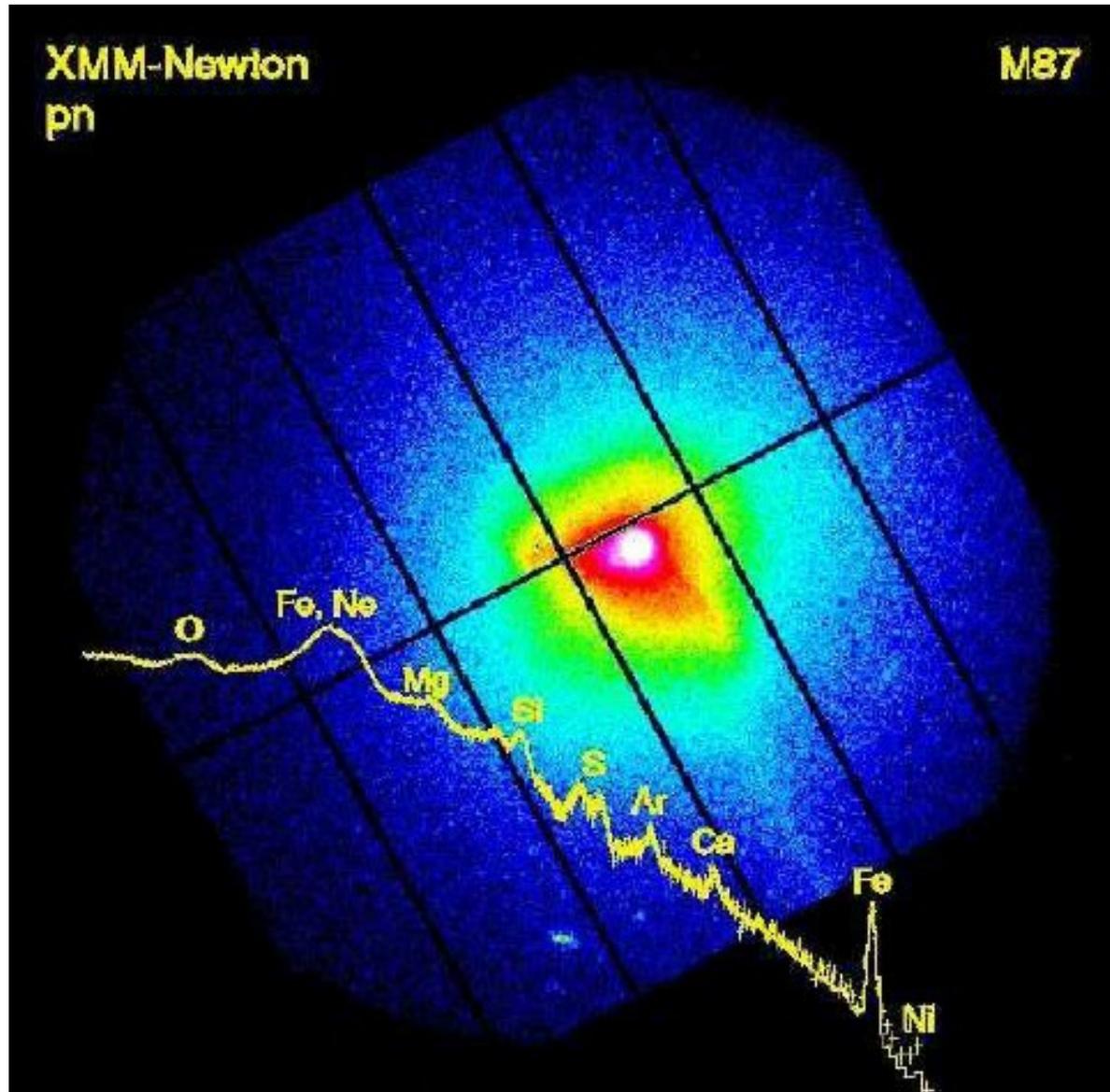
Dressler 1980

11.2 Galaxienhaufen: Zusammensetzung

- 2% - 6% Galaxien
- 15% - 20% Heißes Gas
- 74% - 83% Dunkle Materie



11.3 Röntgengas in Galaxienhaufen



11.3 Röntgengas in Galaxienhaufen

Bremsstrahlung

Electronically excited emission lines

X-ray emission originates from 20-100 Mill. K plasma

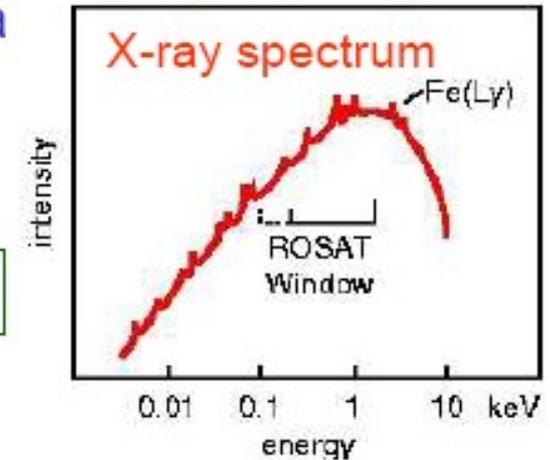
$$L_x = 10^{43} - 3 \cdot 10^{45} \text{ erg/s}$$

$$n_e \sim 10^{-4} - 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$$

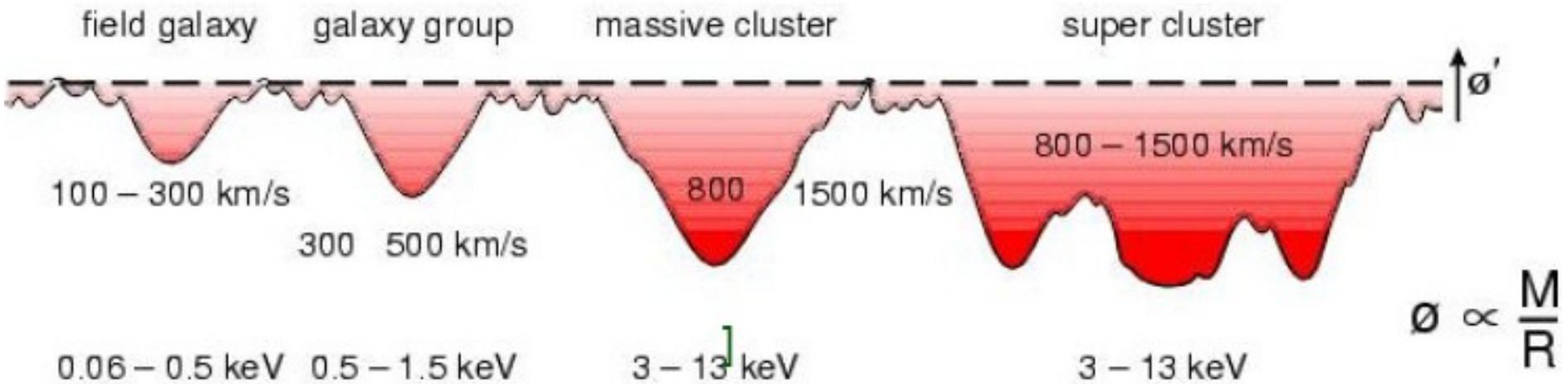
$$M_{\text{Gas}} = 10^{13} - 10^{15} M_{\text{Sun}}$$

$$kT = 2 - 10 \text{ keV}$$

$$1 \text{ keV} := 11.6 \text{ Mill. K}$$

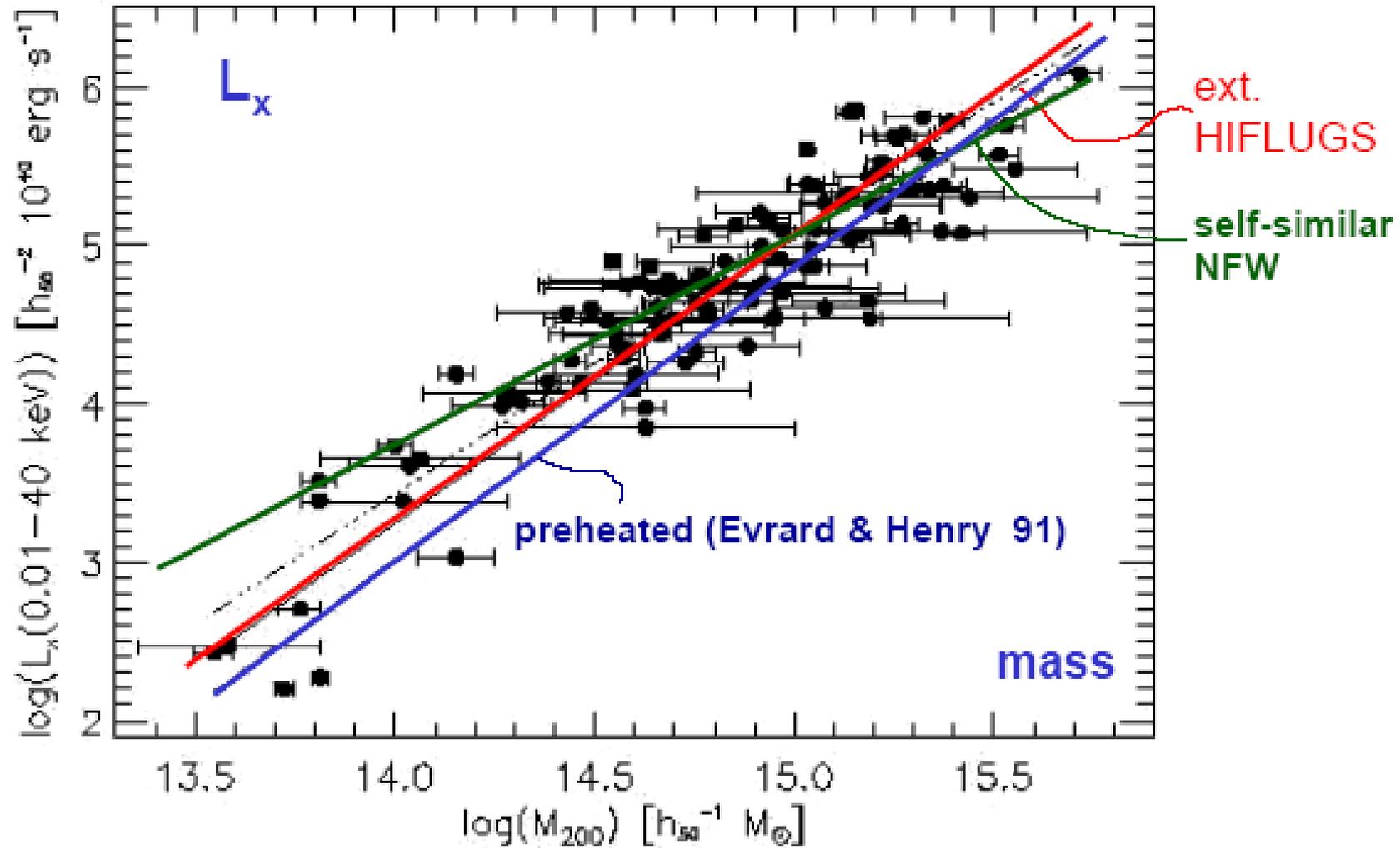


Sketch of the cosmic potential



Metallicity $\sim 1/3$ solar

11.3 Röntgengas in Galaxienhaufen: Masse-Leuchtkraft Beziehung



11.3 Röntgengas in Galaxienhaufen

Es gibt die folgende **Zusammenhänge** zwischen den Komponenten eines Galaxienhaufens

- Masse steigt mit Röntgenleuchtkraft
- Zentrale Galaxiendichte steigt mit Röntgen-Leuchtkraft
- Anteil der Spiralgalaxien sinkt mit Röntgen-Leuchtkraft
- Temperatur ist proportional zu Röntgenleuchtkraft
- Metallizität fällt mit zunehmender Temperatur
- Verhältnis Gas / Galaxien Masse steigt mit Temperatur bis zu einem Faktor 5

Weder das heiße Gas noch die Galaxien können die Gesamtmasse erklären

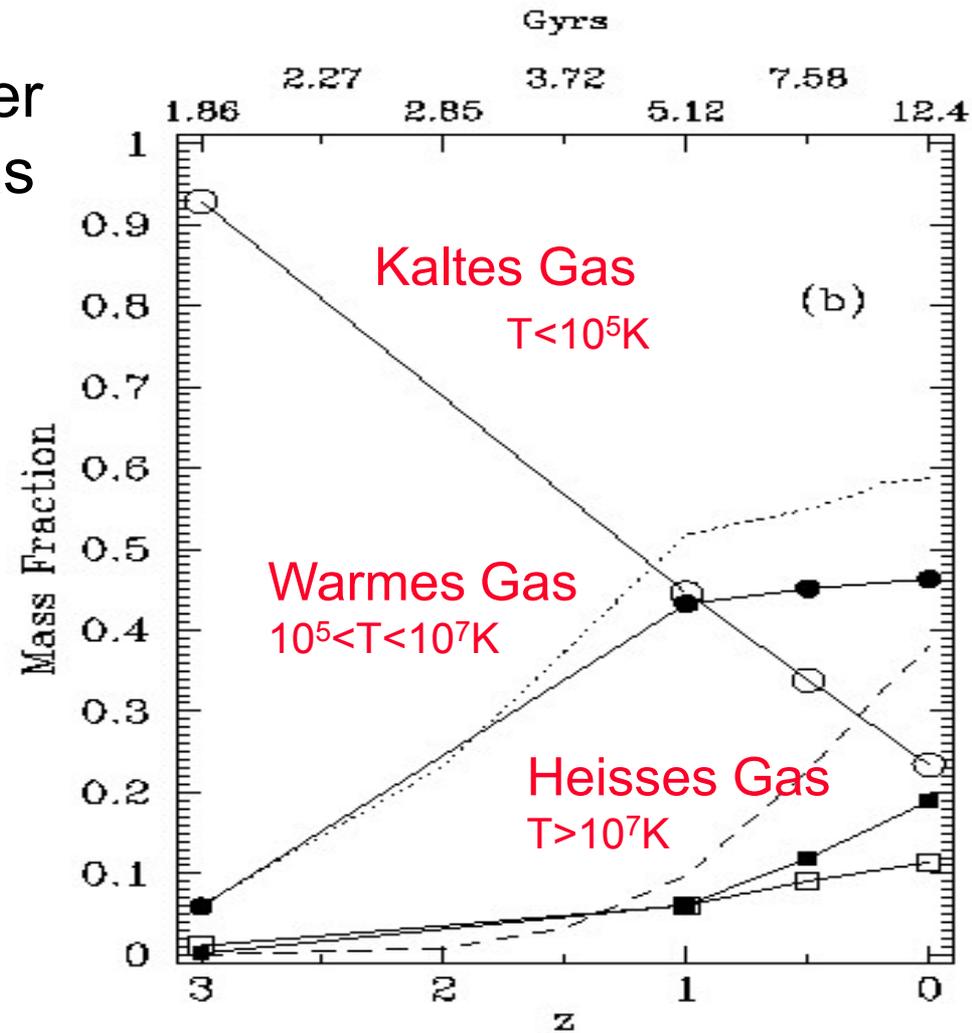
-> **Dunkle Materie**

Galaxien : X-ray-Gas : Dunkler Materie $\approx 1 : 5 : 25$

11.3 Röntgengas in Galaxienhaufen: Entwicklung der Baryonen

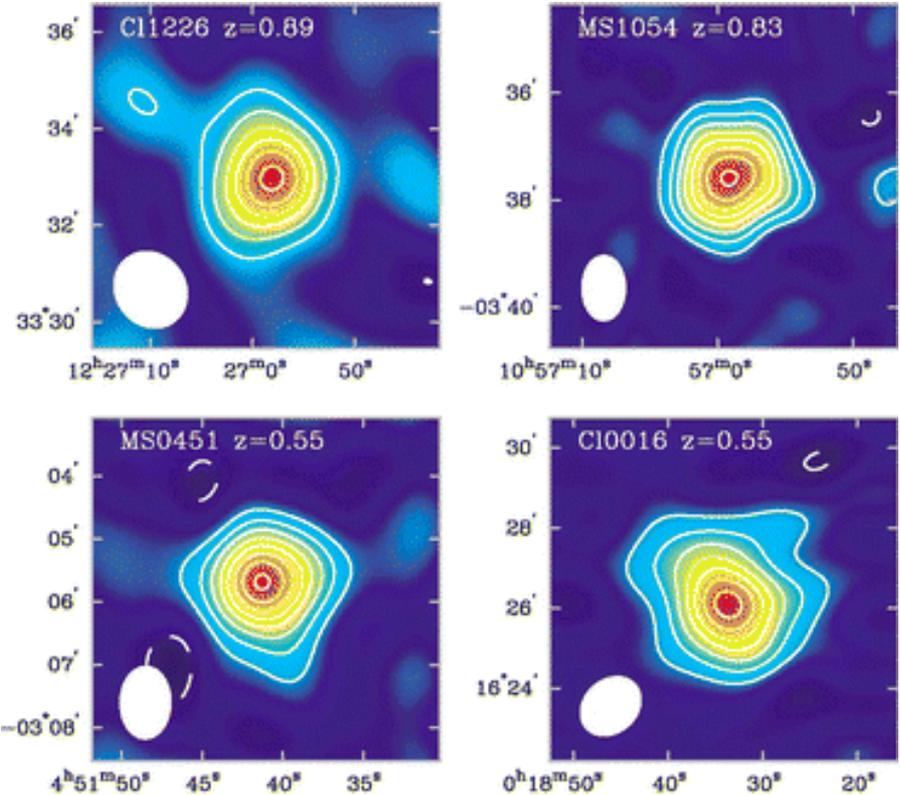
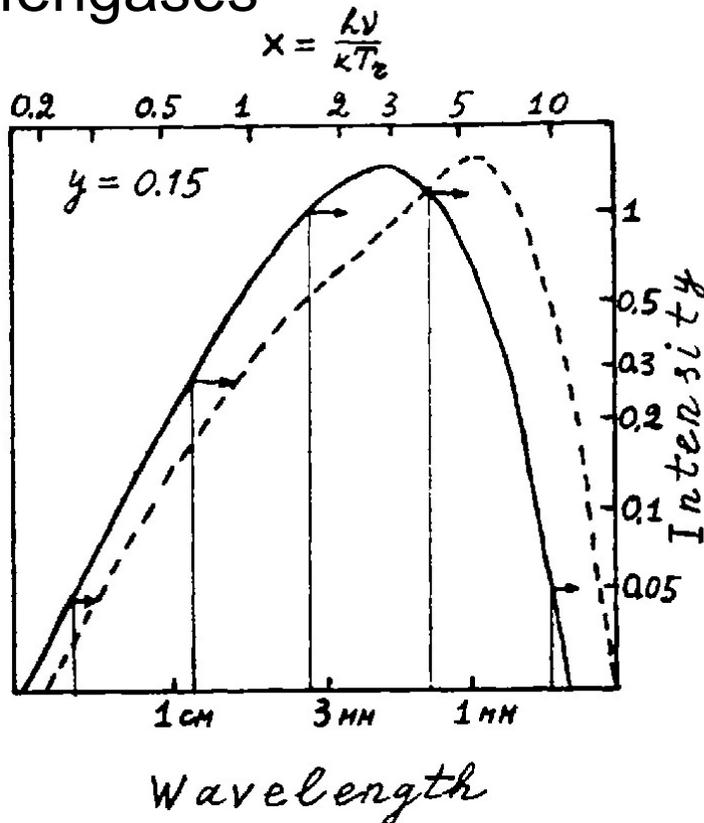
Während sich das Universum im Ganzen **ausdehnt** und immer kälter wird, klumpt sich das Gas immer stärker zusammen und erhitzt sich immer weiter.

Heute ist schon mehr als die Hälfte des Gases heißer als 100.000 C



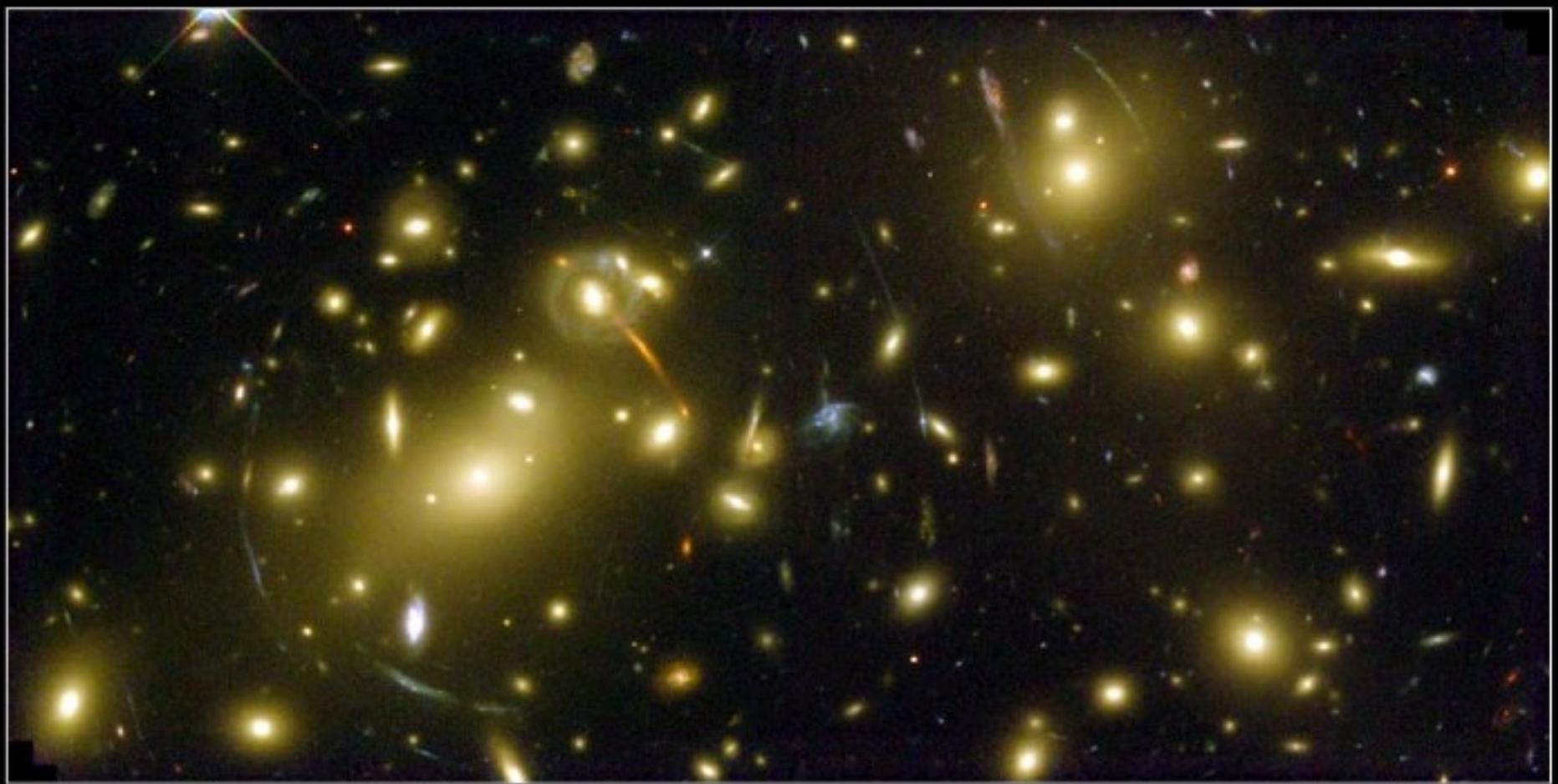
11.3 Röntgengas in Galaxienhaufen: Sunyaev-Zeldovich Effekt

Compton Streuung der kosmischen Hintergrundstrahlung an den Elektronen des heißen Haufengases



Unabhängig von Rotverschiebung
-> gut geeignet für Suche nach
Galaxienhaufen bei hohen z

11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen

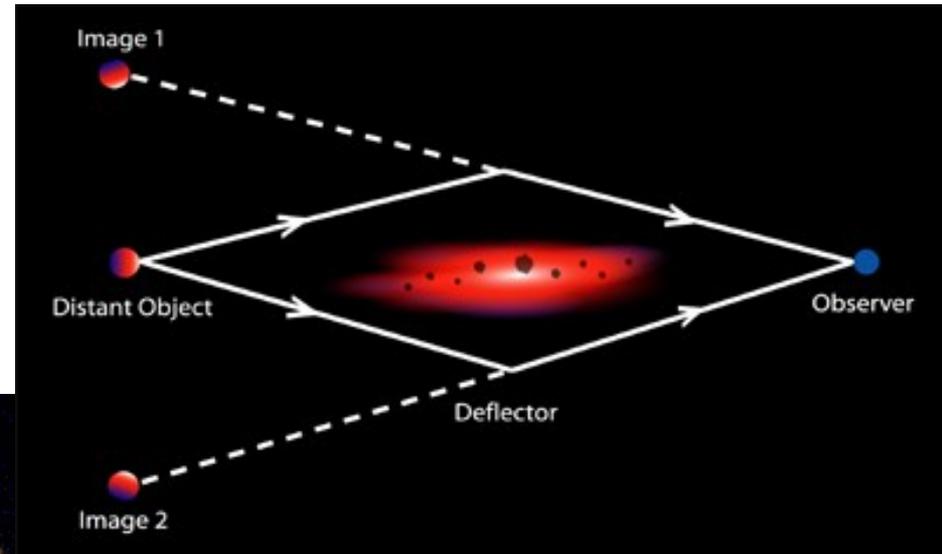


Galaxy Cluster Abell 2218

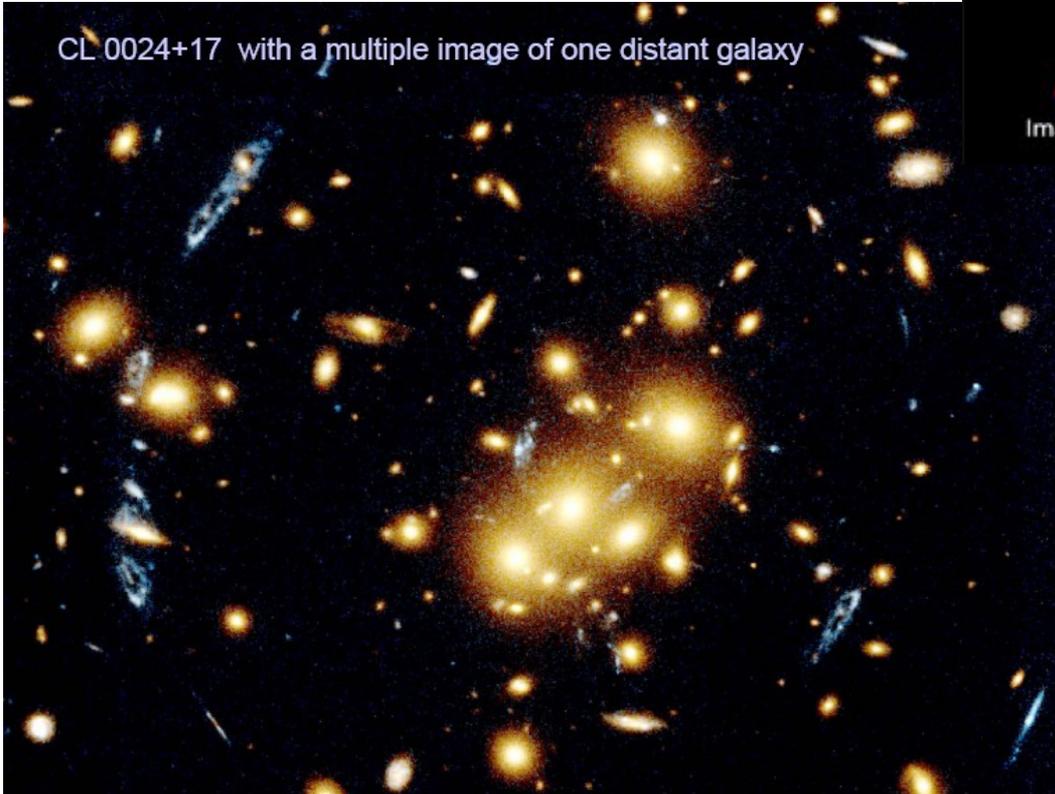
HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen

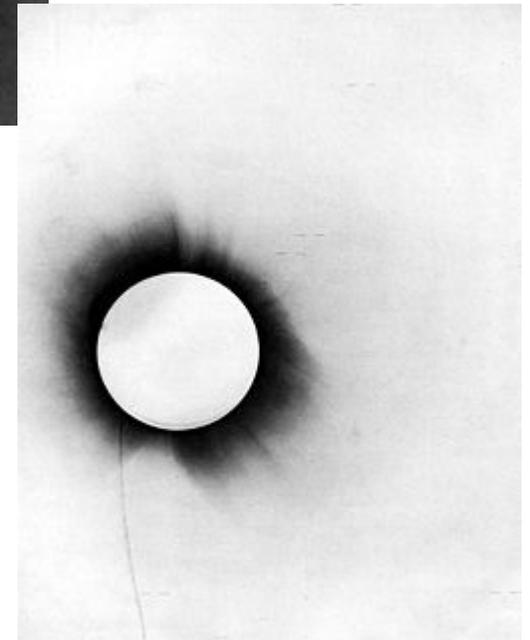


CL 0024+17 with a multiple image of one distant galaxy



11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen

- Konsequenz aus Einstein's **Allgemeiner Relativitätstheorie**
- Erstmals 1919 von Eddington während einer Sonnenfinsternis bei der **Sonne** nachgewiesen, die das **Licht von Sternen um 1.7''** ablenkt



11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen

In a naive Newtonian approximation one would derive:

$$\alpha = \frac{v_z}{c} = \frac{1}{c} \int \underbrace{\frac{d\Phi}{dz}}_* dt = \frac{1}{c^2} \int \frac{d\Phi}{dz} dl$$

*: acceleration in z direction; because the acceleration doesn't depend on the energy of the photons, gravitational lenses are achromatic.

This result differs only by a factor of two from the correct general relativistic result:

$$\vec{\alpha} = \frac{2}{c^2} \int \vec{\nabla}_{\perp} \Phi dl \quad \text{G.R.}$$

where the deflection angle α , written as vector $\vec{\alpha}$ perpendicular to the light propagation \vec{l} , is the integral of the potential gradient perpendicular to the light propagation.

For a point mass the potential can be written as:

$$\Phi(l, z) = \frac{-GM}{(l^2 + z^2)^{1/2}}$$

Therefore:

$$\frac{d\Phi}{dz} = \frac{+GMz}{(l^2 + z^2)^{3/2}} \quad (= \vec{\nabla}_{\perp} \Phi)$$

11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen

After integration:

$$\alpha = \frac{2}{c^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{GMz}{(l^2 + z^2)^{3/2}} dl = \frac{4GMz}{c^2} \int_0^{+\infty} \frac{dl}{(l^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{4GMz}{c^2} \left[\frac{l}{z^2(l^2 + z^2)^{1/2}} \right]_0^{+\infty}$$

Thus the deflection angle α for a light ray with impact parameter $b = z$ near the point mass M becomes:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b} = \frac{2R_S}{b}$$

where $R_S = \frac{2GM}{c^2}$ is the **Schwarzschild radius** of the mass M , i.e. the radius of the black hole belonging to the mass M .

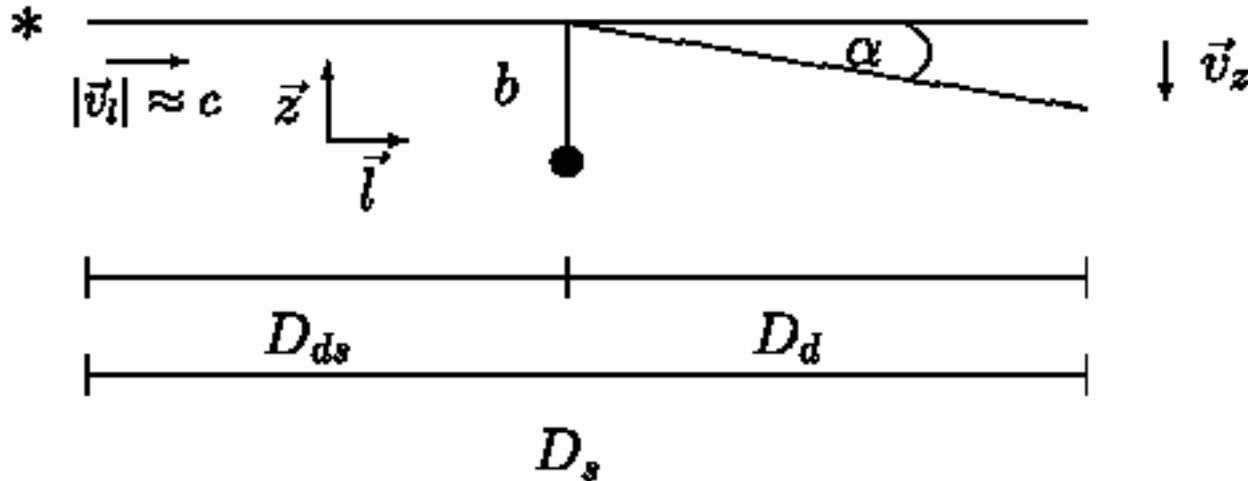
Therefore for the sun ($M_\odot \simeq 2 \cdot 10^{33} \text{ g} \Rightarrow R_S \simeq 3.0 \text{ km}$) we get a deflection angle α at the Radius of the sun ($\simeq 700000 \text{ km}$) of:

$$\alpha_{\odot, R_\odot} \simeq 1.7''$$

In order to calculate the deflection angle α caused by an arbitrary mass distribution (e.g. a galaxy cluster) we use the fact that the extent of the mass distribution is very small compared to the distances between source, lens and observer:

$$\Delta l \ll D_{ds} \text{ and } \Delta l \ll D_d$$

11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen



The **light path** from the source to the observer can then be broken up into three distinct zones:

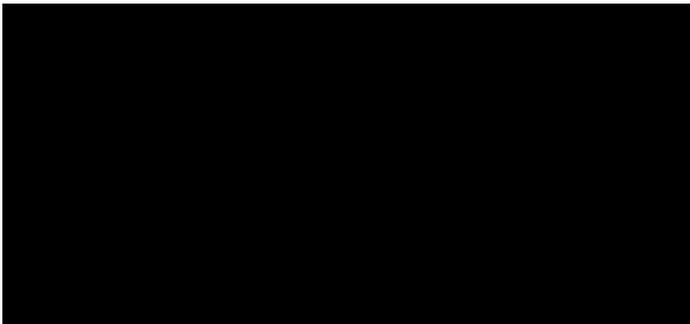
1. Light travels from the source to a point close to the lens through **unperturbed spacetime**
2. Near the lens the light is **deflected**.
3. Light travels to the observer through **unperturbed spacetime**

11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen

Einsteinradius θ_E (or actually: Einstein angle)

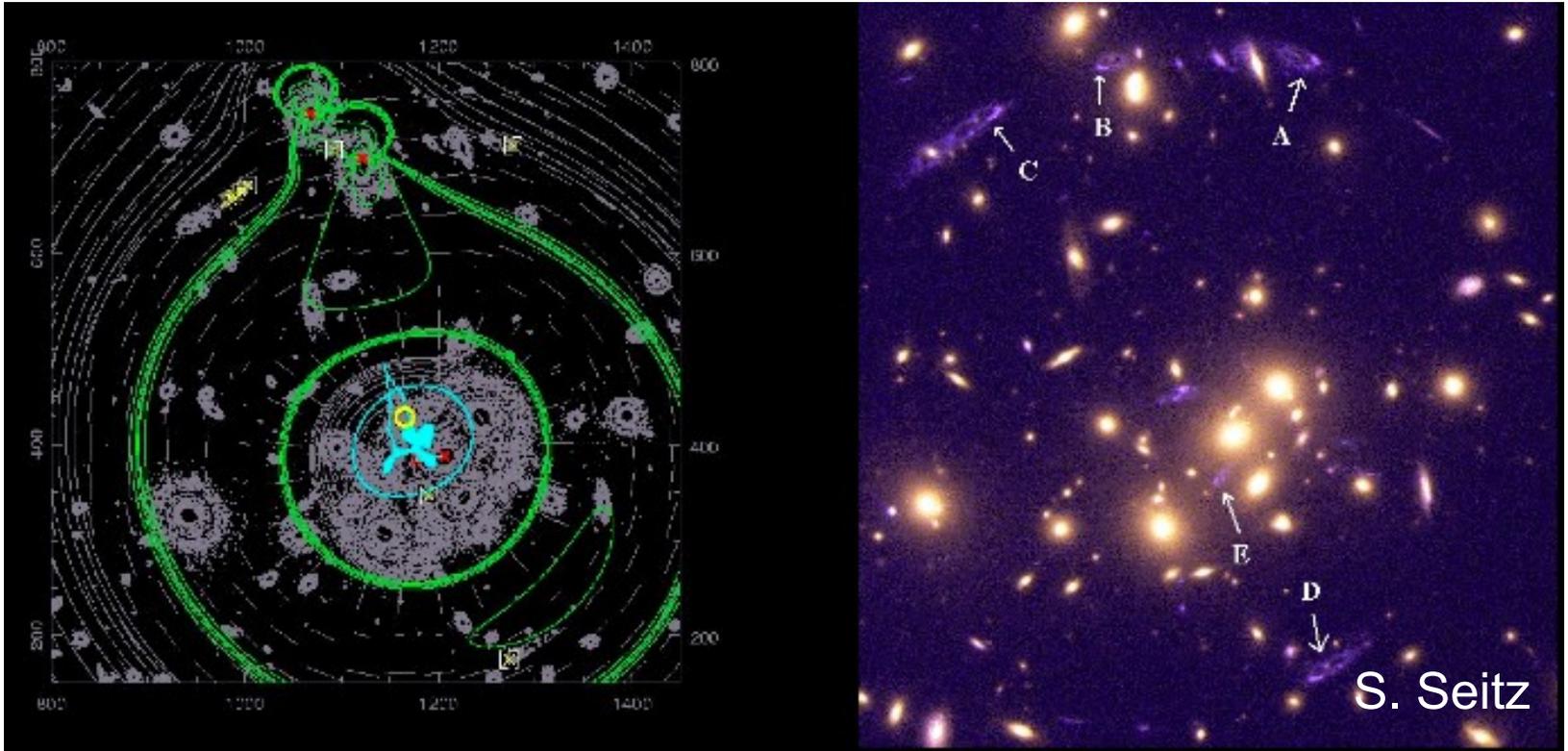
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s}}$$

Because of rotational symmetry of the lens system, for a **circularly symmetric lens with an arbitrary mass profile** a source lying exactly on the optical axis is imaged as a ring. This ring is the so called **Einstein ring**.



$$\text{where } D = \frac{D_s D_d}{D_{sd}}$$

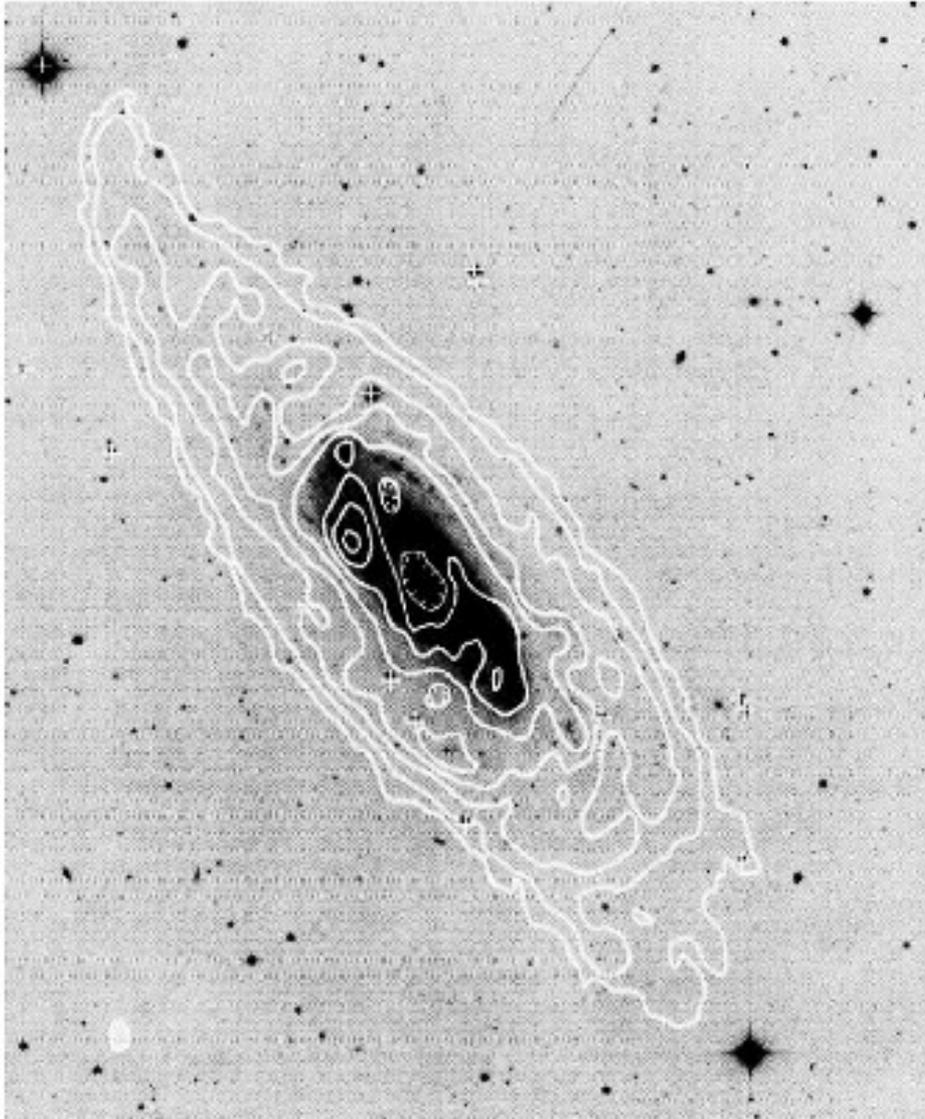
11.4 Masse von Galaxienhaufen: Gravitationslinsen



Masse des Galaxienhaufen – aus dem Gravitationslinsen Effekt berechnet – ist um einen Größenordnung kleiner als die Gesamtmasse der Galaxien

-> **Dunkle** Materie

11.5 Dunkle Materie: Spiralgalaxien

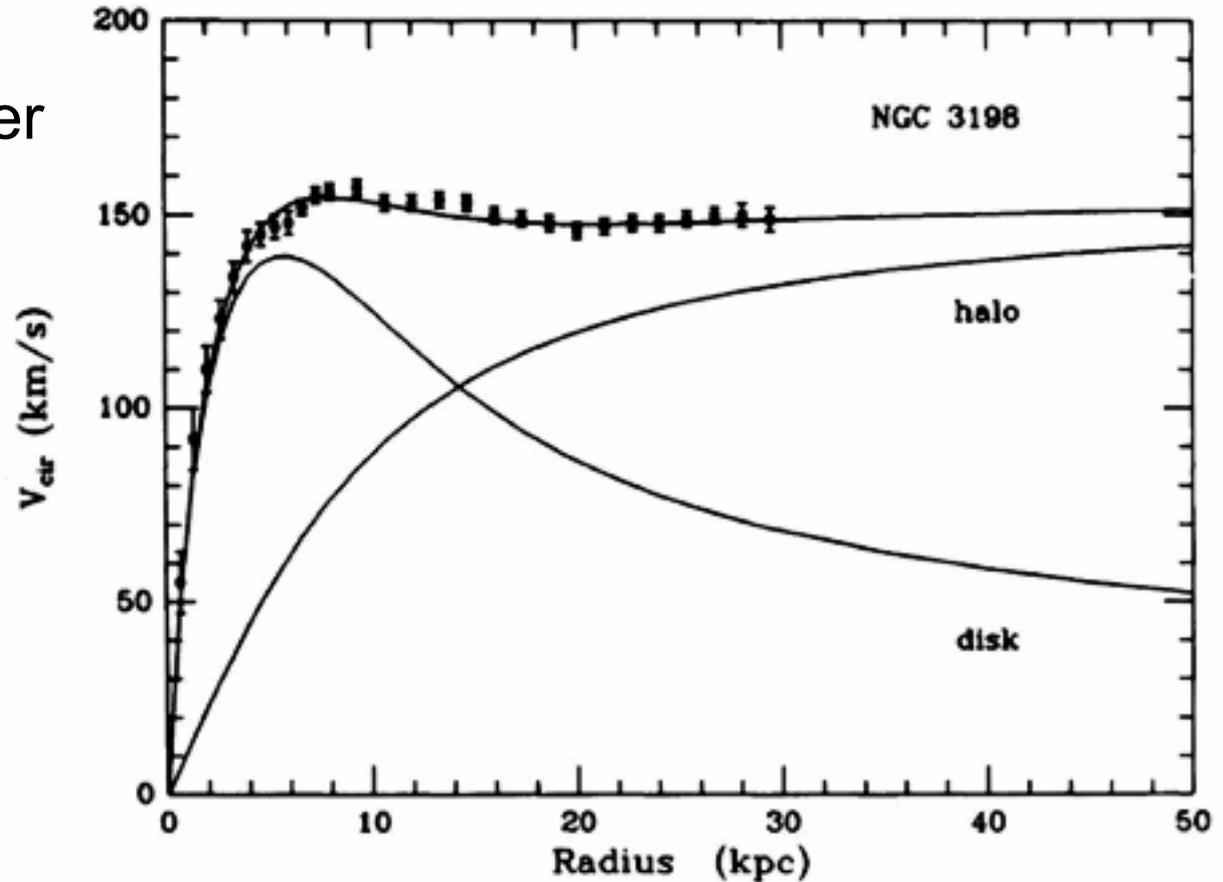


Optische Helligkeit (Negativ) und H I Gas (Konturen) einer **Spiralgalaxie** (van Albada et al.)

Das H I Gas erstreckt sich bis weit außerhalb der optisch sichtbaren Scheibe und erlaubt die Messung der **Rotationskurve** bei großen Radien.

11.5 Dunkle Materie: Spiralgalaxien

Rubin (1975): Die meisten Sterne einer Galaxie **rotieren** ungefähr mit der gleichen **Geschwindigkeit**

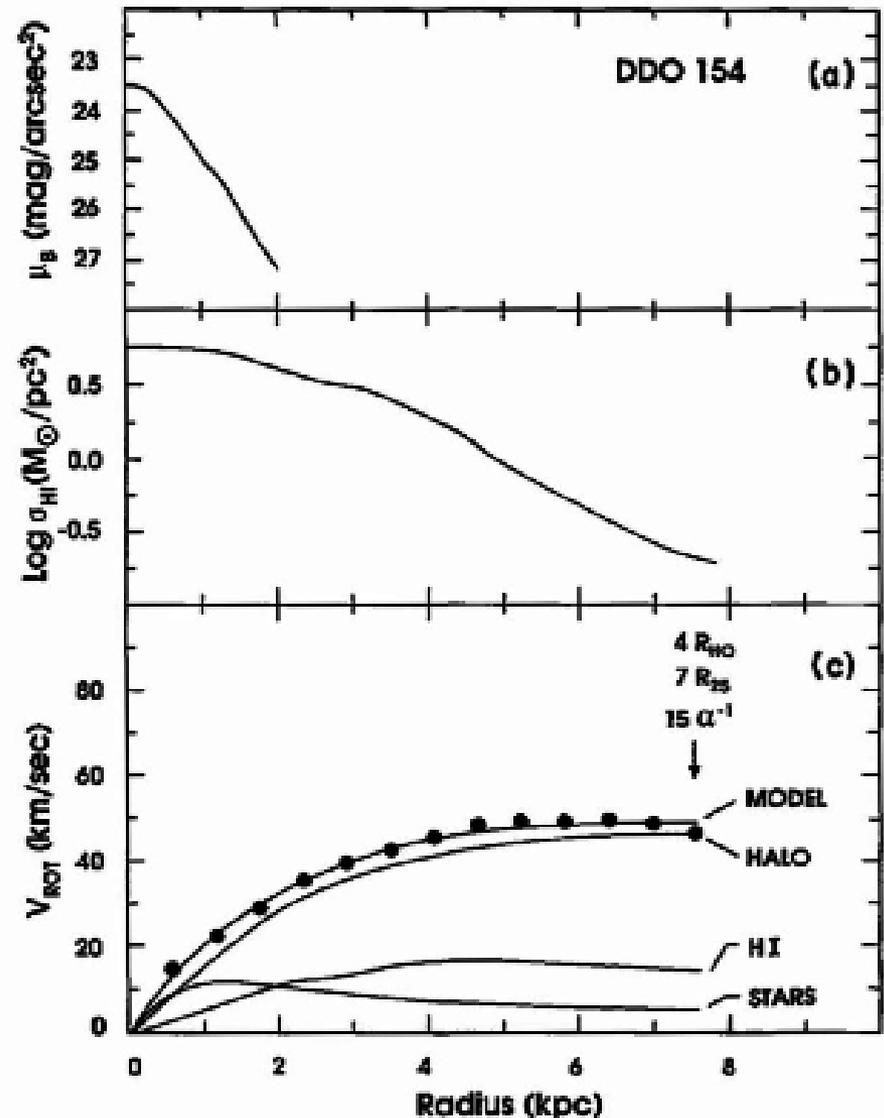


van Albada et al.

$$\Phi = \Phi_{\text{halo}} + \Phi_{\text{disc}} \Rightarrow v_c^2 = v_{c,\text{halo}}^2 + v_{c,\text{disc}}^2 \quad (v_c^2 = r \frac{\partial \Phi}{\partial r})$$

11.5 Dunkle Materie: Irreguläre Galaxien

Flächenhelligkeit der Sterne und des H I Gases, und die Rotationskurve einer Irregulären Galaxie (Carignan & Freeman 1988)



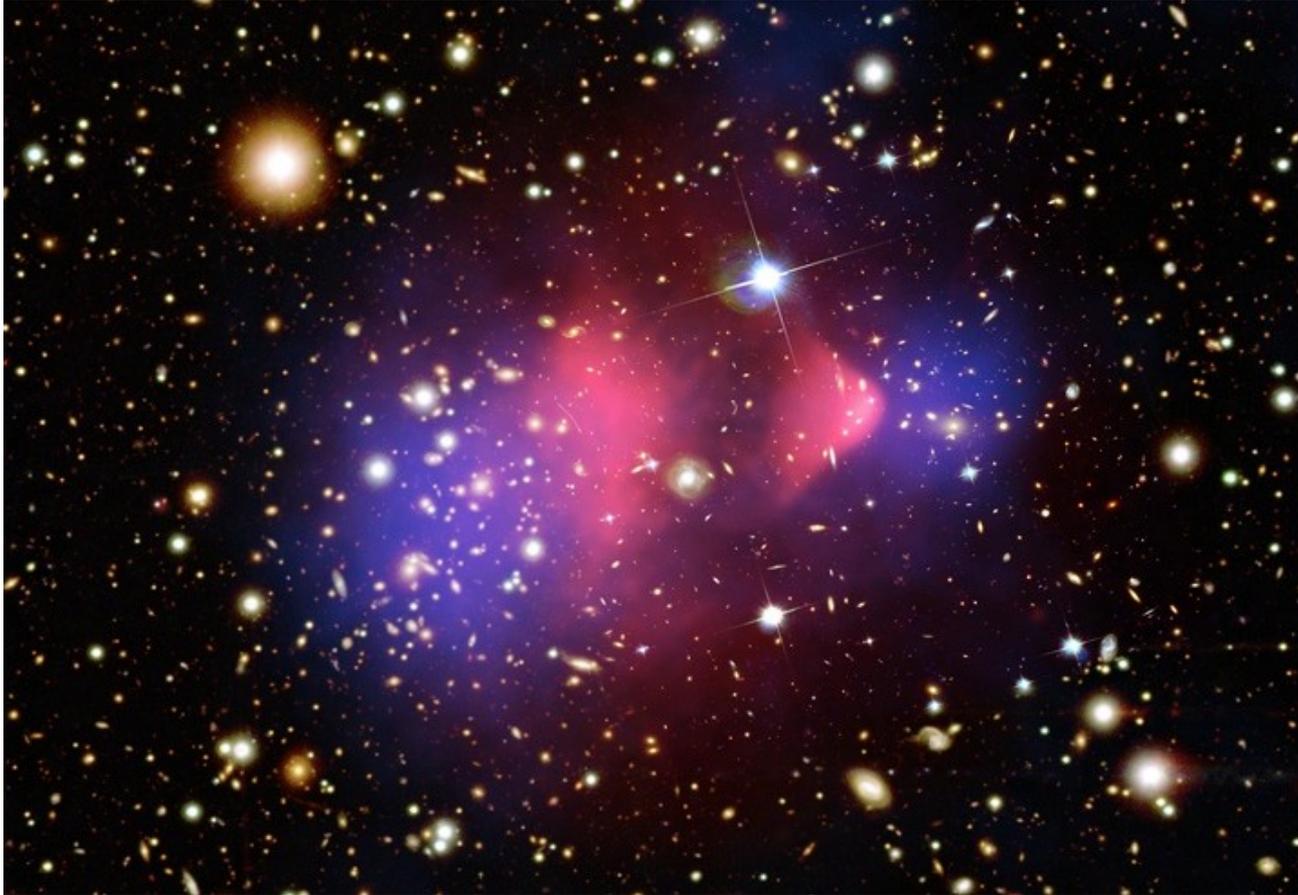
11.5 Dunkle Materie: Zusammenfassung der Beobachtungsbefunde

- Rotationsgeschwindigkeit von Sternen und ISM Wolken in Spiralgalaxien fällt in den Außenregionen nur wenig oder gar nicht ab
-> *zusätzliche Masse benötigt !*
- Kinematische Bewegung von Sternen in Zwerggalaxien ohne zusätzliche Masse nicht erklärbar -> *über eine Größenordnung an zusätzlicher Masse benötigt*
- Geschwindigkeit der Galaxien in Galaxienhaufen lässt auf zusätzliche Masse schließen (Zwicky 1934)
- Masse von Galaxienhaufen aus Gravitationslinsen ohne zusätzliche Masse (*ca. eine Größenordnung*) nicht erklärbar

11.5 Dunkle Materie: Kandidaten

- **Baryonische** Dunkle Materie (Protonen, Neutronen, ...)
 - Gas (z.B. heißes und kaltes intergalaktisches Medium)
 - Kompakte Objekte (z.B. Braune Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher)
- **Nichtbaryonische** Materie
 - Heiße Materie: Ultrarelativistische Teilchen, gegenüber Impuls vernachlässigbare Ruhemasse, $E \sim pc$ (z.B. Neutrinos)
 - **Kalte Materie**: Ruhemasse dominiert über Impuls $E \sim mc^2$ (z.B. WIMPs, Sterile Neutrinos, Axione)

10.5 Dunkle Materie: Galaxienhaufen



Rot: Heißes
Röntgen Gas

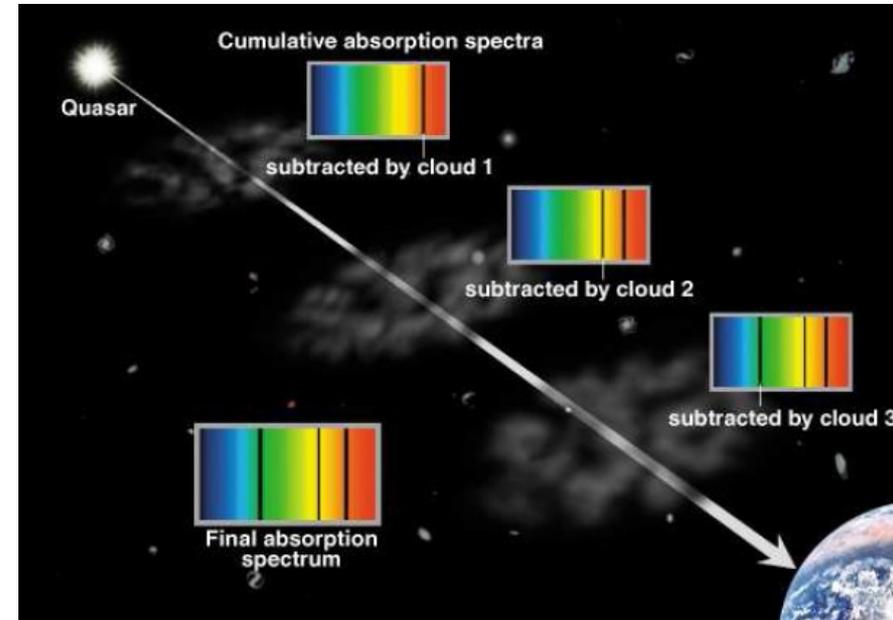
Blau:
Massenver-
teilung
gemessen
aus dem
Gravitations-
linseneffekt

-> Heißes intergalaktischen Gas ist **nicht** die Dunkle Materie

11.5 Dunkle Materie: Lyman α forest

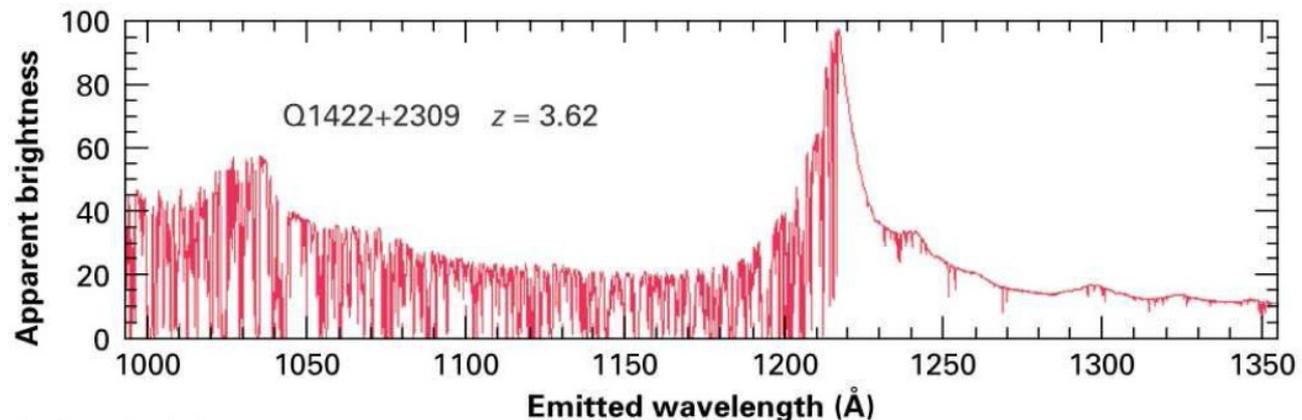
Lyman α forest

- zahlreiche schwache Absorptionslinien von Wasserstoffwolken im Spektrum von Quasaren
- proto-galaktische, intergalaktische Wolken, keine Galaxien



Geringe Dichte:

-> **Kaltes Integalaktische Medium (IGM)** ist **nicht** die Dunkle Materie

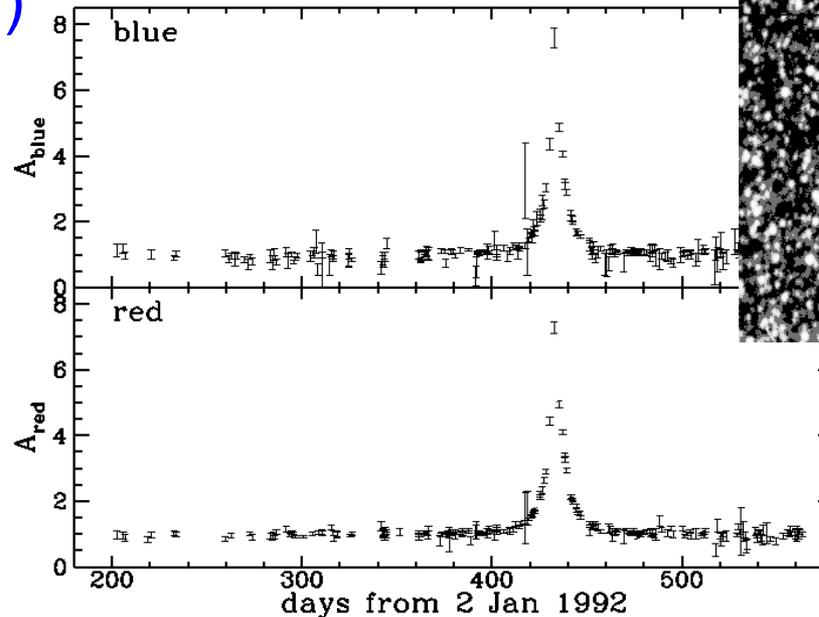
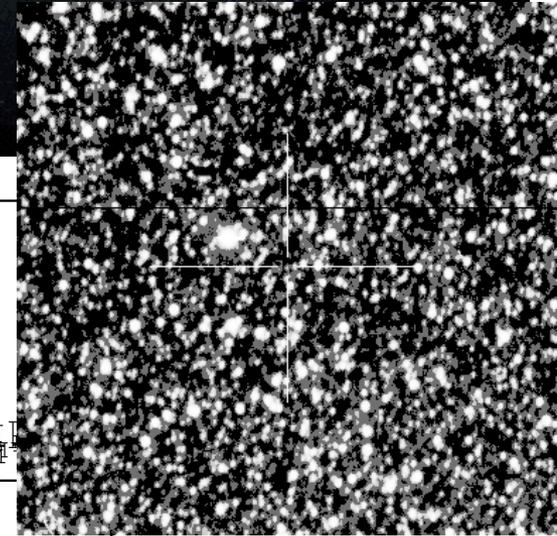
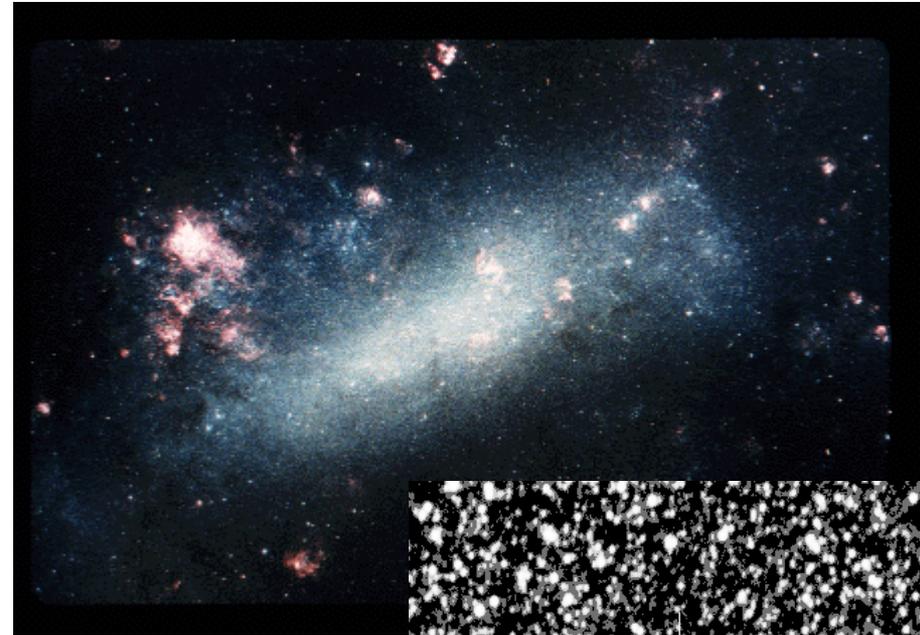


11.5 Dunkle Materie: MACHOs

MACHOs (massive compact halo objects):

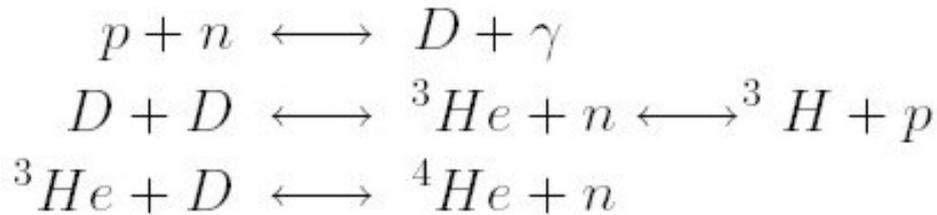
- Ausgekühlte Weiße Zwerge, kühle Braune Zwerge, ...
- Nachweis über **Mikrolinsen** (Gravitationslinsen) Effekte

-> **MACHOs** sind **nicht** die Dunkle Materie



11.5 Dunkle Materie: Primordiale Nukleosynthese

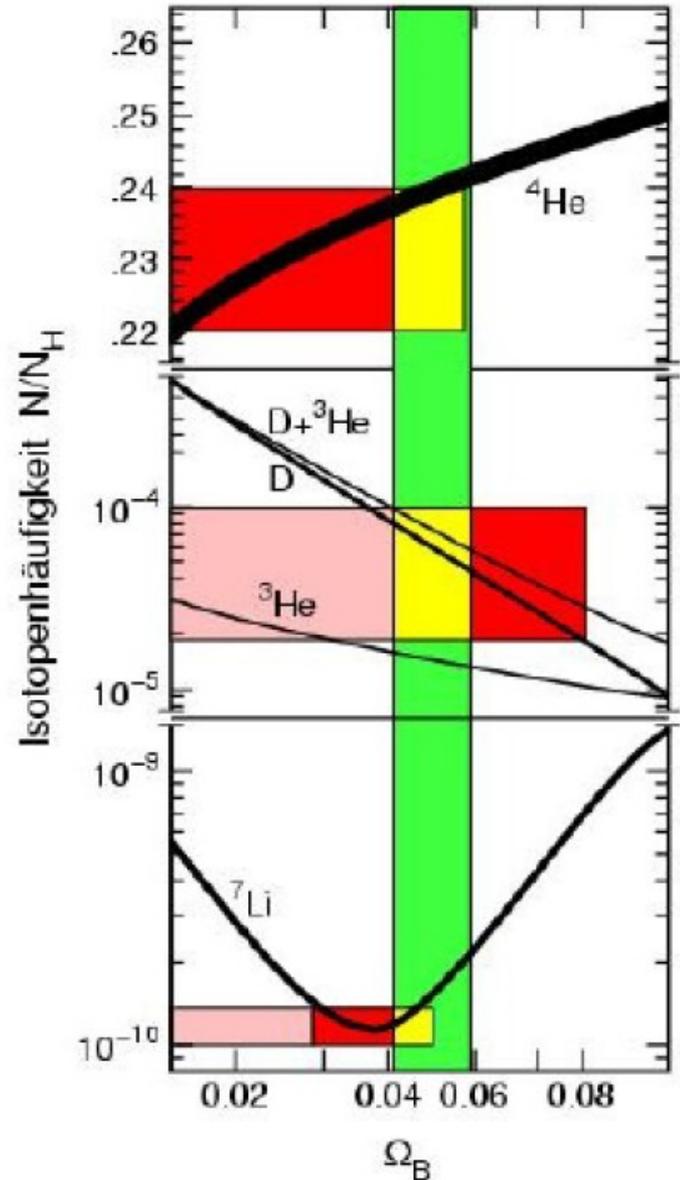
Nach dem Urknall fällt die Temperatur soweit, dass Protonen und Neutronen zu leichten Elementen fusionieren



Dabei ist insbesondere die Fusion von D zu He Dichteabhängig

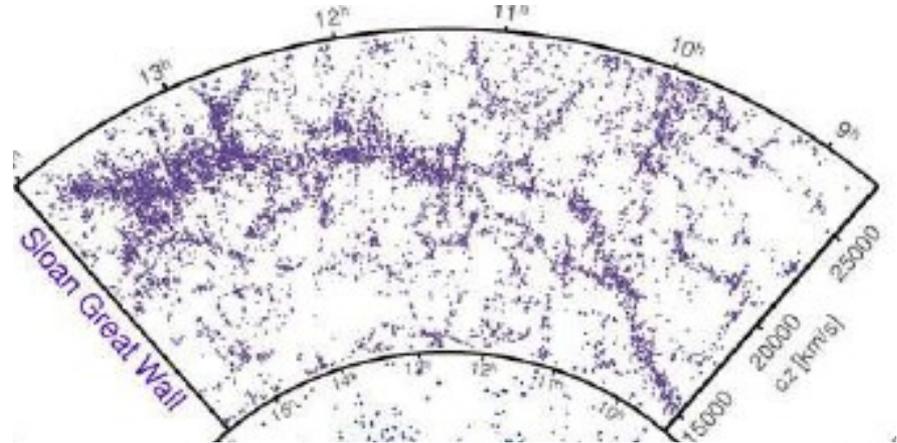
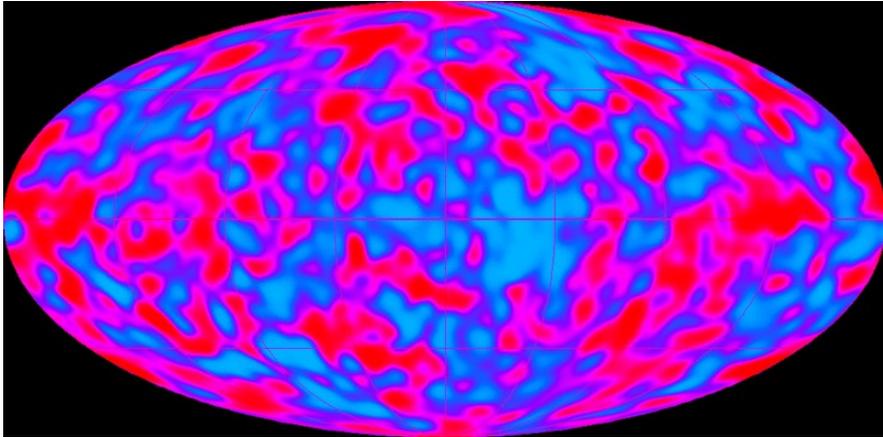
→ $\Omega_B \sim 0.07 \Omega_0$

-> Dunkle Materie ist **nicht baryonisch**

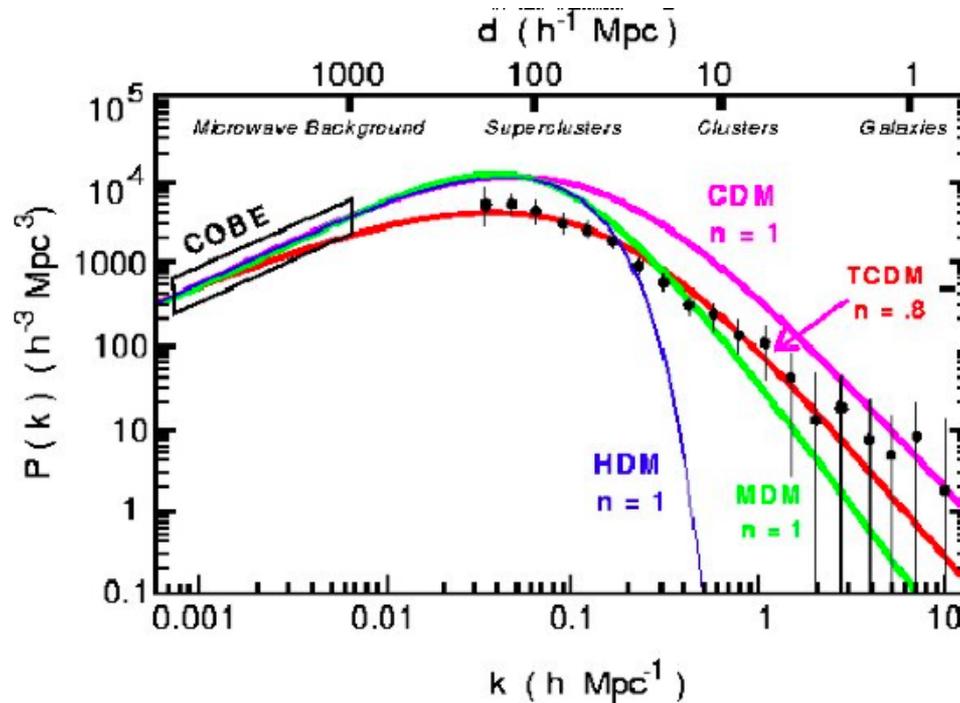


11.5 Dunkle Materie: Strukturbildung

Kosmische Hintergrundstrahlung Galaxiendurchmusterung



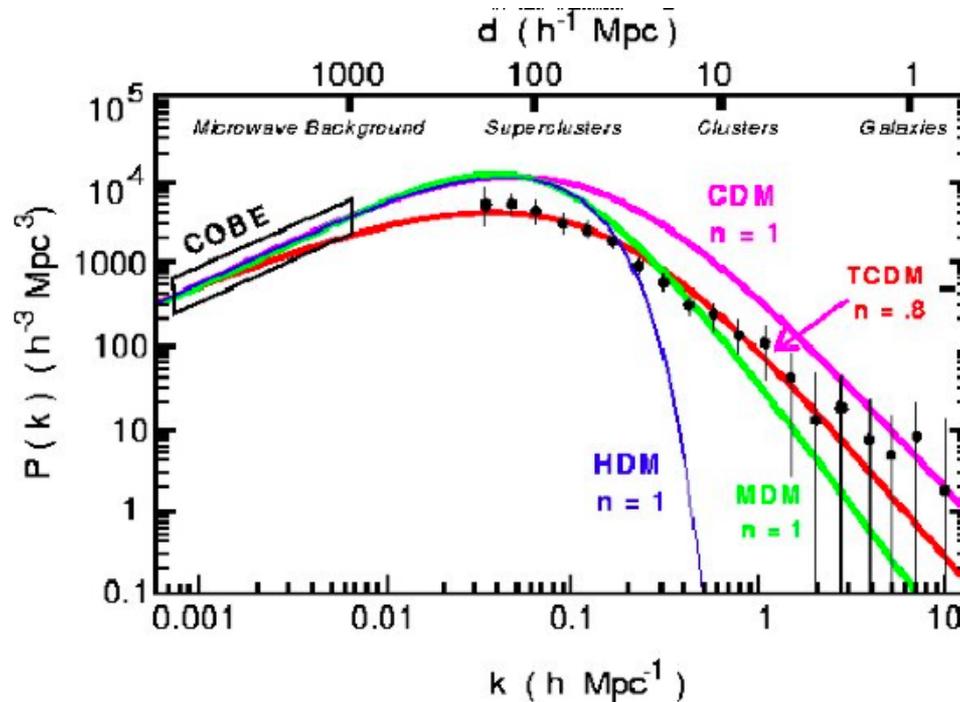
Kombiniertes
Leistungs-
spektrum



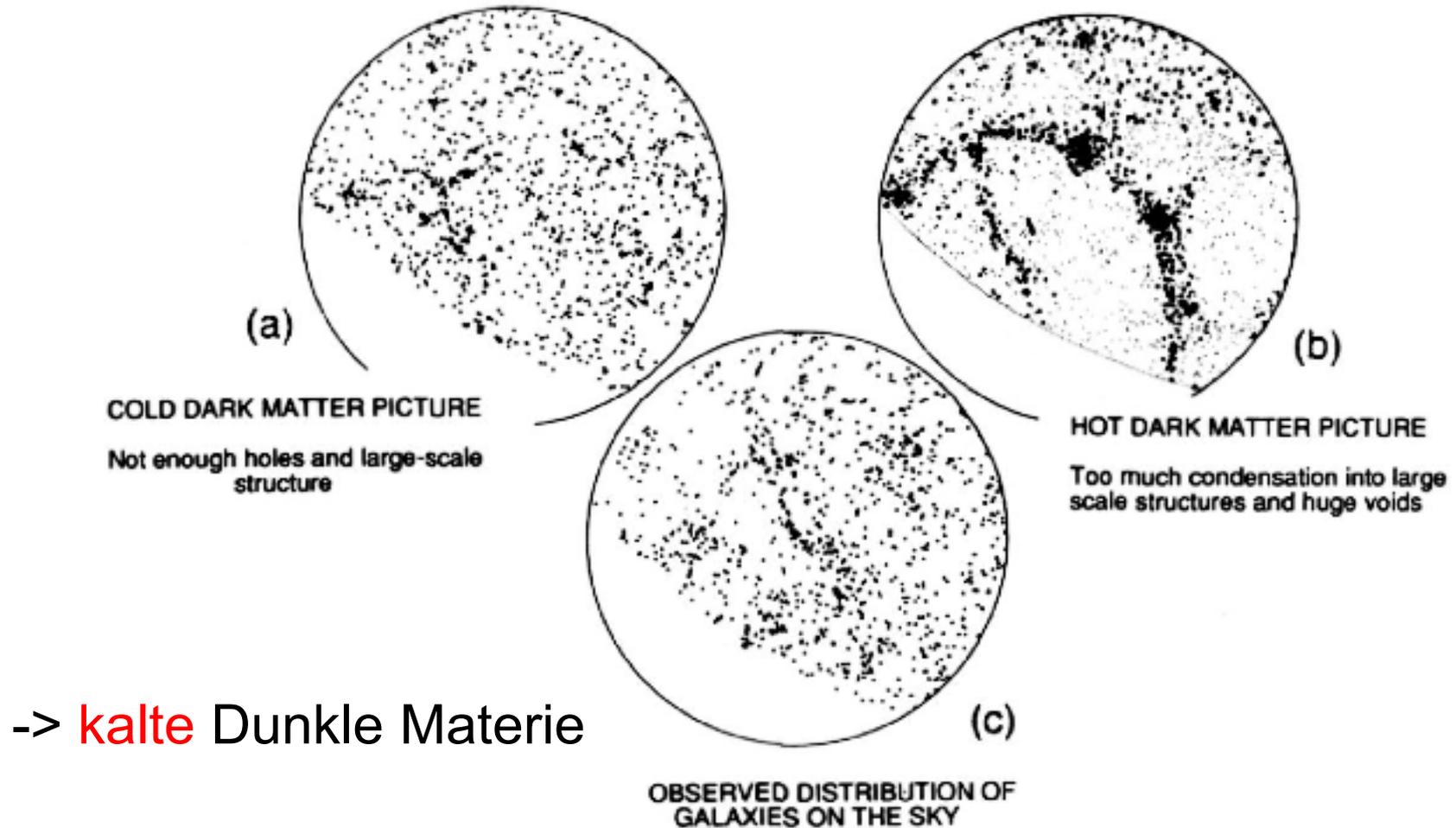
11.5 Dunkle Materie: Strukturbildung

Nach dem Urknall hatte die gewöhnliche Materie eine zu **hohe Temperatur und einen zu hohen Druck** um kleinere Strukturen (Galaxienhaufen und Galaxien) über einen Gravitationskollaps (Jeans-Instabilität) so häufig auszubilden
-> **kalte** Dunkle Materie (auch keine Neutrinos, da diese selbst bei kleiner Ruhemasse noch immer relativistisch sind)

Kombiniertes
Leistungs-
spektrum



11.5 Dunkle Materie: Strukturbildung



-> kalte Dunkle Materie

(From Longair, Galaxy Formation, Springer-Verlag 1998)

11.5 Dunkle Materie: Arten

- **Baryonische** Dunkle Materie (Protonen, Neutronen, ...)
 - Gas (z.B. heißes und Kaltes intergalaktisches Medium)
 - Kompakte Objekte (z.B. Braune Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher)
- **Nichtbaryonische** Materie
 - Heiße Materie: Ultrarelativistische Teilchen, gegenüber Impuls vernachlässigbare Ruhemasse, $E \sim pc$ (z.B. Neutrinos)
 - **Kalte Materie**: Ruhemasse dominiert über Impuls $E \sim mc^2$ (z.B. WIMPs, Sterile Neutrinos, Axione)

11.5 Dunkle Materie: Arten

- ~~Baryonische~~ Dunkle Materie (Protonen, Neutronen, ...)
 - ~~Gas~~ (z.B. heißes und Kaltes intergalaktisches Medium)
 -  Lensing, Lyman α forest
 - ~~Kompakte Objekte~~ (z.B. Braune Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher)
 -  MACHOs
- Nichtbaryonische Materie
 - ~~Heiße~~ Materie: Ultrarelativistische Teilchen, gegenüber Impuls vernachlässigbare Ruhemasse, $E \sim pc$ (z.B. Neutrinos)
 -  Kosmologische Strukturbildung
 -  **Kalte Materie**: Ruhemasse dominiert über Impuls $E \sim mc^2$ (z.B. WIMPs, Sterile Neutrinos, Axione)

11.5 Dunkle Materie: WIMPs

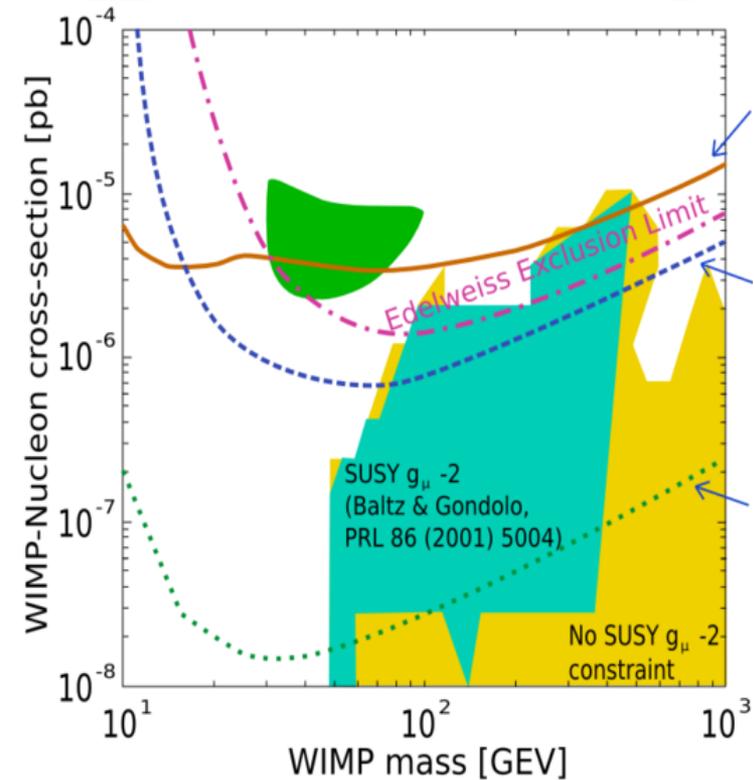
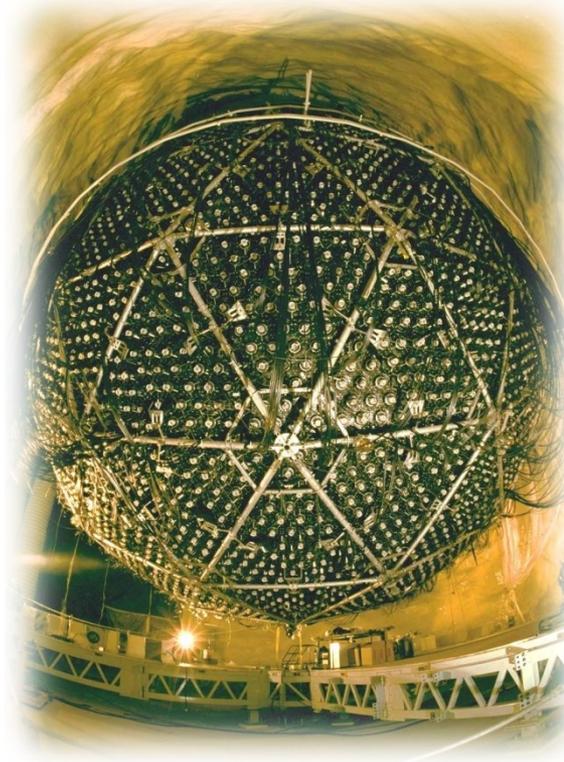
WIMPs (weakly interacting massive particles)

- Keine elektromagnetische und starke Wechselwirkung
- Nur Gravitation und **Elektroschwache Wechselwirkung**
- Hypothetische Teilchen einer **super-symmetrischen (SUSY)** Erweiterung des Standardmodells
- Möglicher Nachweis
 - **Direkt**: Nachweis der Rückstoßenergie
 - **Indirekt**: Nachweis der Annihilationsprodukte
- Bisher **kein** experimenteller Nachweis:
Masse mindestens $> 10^2$ GeV

11.5 Dunkle Materie: Direkter Nachweis von WIMPs

Direkt: Messung der Rückstoßenergie

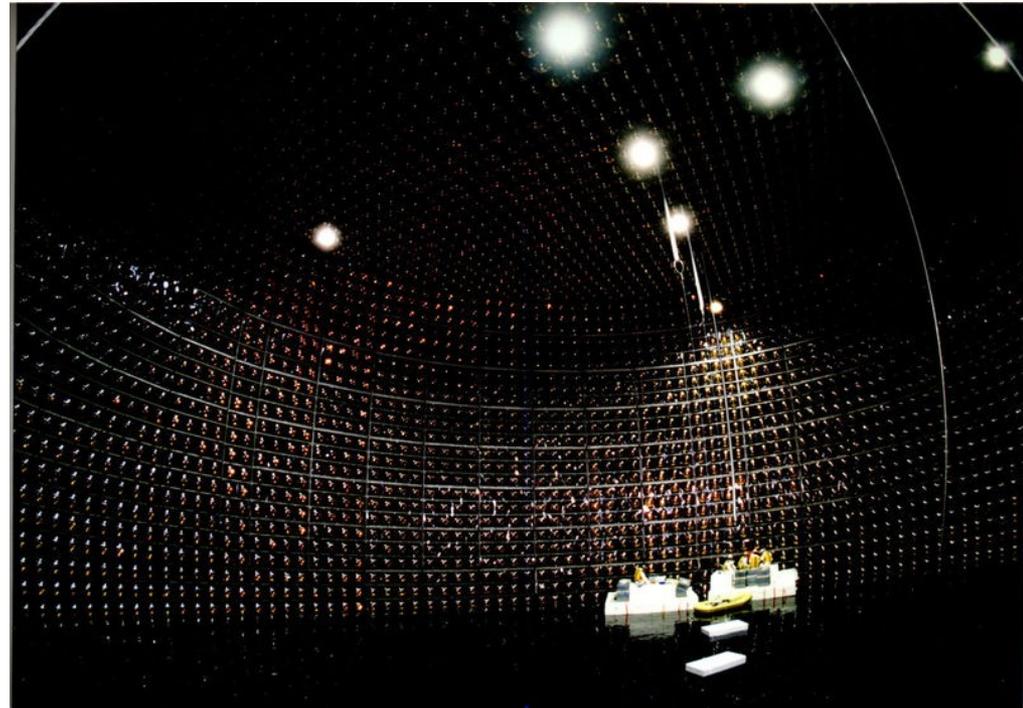
- Ultrakalte Silizium oder Germanium Bolometer (Edelweiss, Soudan)
- Szintillation (DEAP, DAMA)



11.5 Dunkle Materie: Indirekter Nachweis von WIMPs

Indirekt: Messung der Annihilationsprodukte

- WIMPs z.B. von Sonne / Erde eingefangen
- Annihilation erzeugt „normale“ Teilchen, z.B. hochenergetische Neutrinos, die der Sonne entweichen können
- Nachweis in Szintillatoren (Super-Kamiokande)



11.5 Dunkle Materie: Andere Kandidaten

- Axionen
 - Hypothetische Teilchen um die das CP Problem des Standard Modells (QCD) zu lösen
 - Goldstone-Boson einer zusätzlichen, spontan gebrochenen Symmetrie
- Sterile Neutrinos
 - Hypothetische Neutrinos die nicht mal elektroschwach wechselwirken, nur über Gravitation
 - Hypothetische Teilchen der Grand Unification Theories (GUT)
 - Mischung mit „gewöhnlichen Neutrinos“ über Dirac Masse

Die dunkle Seite des Universums

